中東・北太平洋航路における
全球数値予報モデルの海上風予測精度検証

学生会員○種本　純（東京大学）　　正会員　大澤　輝夫（神戸大学）
非会員　香西　克俊（神戸大学）　　正会員　塩谷　茂明（神戸大学）

要旨

船舶航行航路上における気象・海象の予測精度はウェザールーティングの鍵を握る．本研究では衛星観測データを用いて，既存研究で検証事例のない中東航路及び北太平洋航路において，気象庁(Japan Meteorological Agency, JMA)，米国国立環境予測センターNCEP(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 及びヨーロッパ中期予報センター(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)の世界を代表する気象機関の全球数値予報モデルの海上風の予測精度を比較検証した．

気象機関別の予測精度の相互比較から，ECMWF の予測精度が最も高いことが明らかになった．また，気象モデル全般の傾向として，1) 予報時間に伴う風速予測精度の悪化傾向は中東航路より北太平洋航路で顕著である 2) 中東航路ではモンスーンの卓越期に同海域の他の季節より顕著に精度が良くなる傾向が見られた．
キーワード：航海・地球環境，気象，数値予報モデル，海上風予測精度，ウェザールーティング

1. 諸言

輸出入の多くを船舶輸送に依存する我が国では，船舶輸送の安全・効率化が多大な利益をもたらすことは明白であり，その手段の一つとして，気象・海象予測を考慮することにより最適航路を選出するウェザールーティング（以降，WR）という手法が用いられている．高嶋ら[(1)] は内航で，西山ら[(2)] は大洋航路で気象庁の気象・海象予測データを用いた WR により燃料消費量が削減可能であることを示している．気象･海象の予測値は誤差を含むものであるが，萩原は[(3)] それらの予測誤差を基に航海時間や燃料消費量の標準偏差を推定する確率的な WR 手法を考案し，予測精度の認識及び改善が WR の正確さを向上させることを示した．

一方で，気象・海象の予測精度については Bidlot ら[(4)] による各気象機関の波浪モデルによる予測精度の相互比較や，メザウィら[(5)] による気象庁全球モデルの精度検証により，予測値の予報時間による精度の低化，季節による精度の変化，気象機関による精度の違いが明らかにされている．しかしながら，WR では一般的な気象・海象の予測精度というよりはむしろ特定の航路上での予測精度に関心が向けられる．先行研究においては中東航路や北太平洋航路などの主要航路上での予測精度の検証は行われておらず，航路上での予測精度及び傾向を明らかにすることにより，更なる WR の開発・発展につながると考えられる．

そこで，本研究では，気象・海象の中でも特に風圧，海流，風浪など様々な形で船舶の航行に影響を及ぼす海上風について，日本の船舶の主な航行航路である中東航路と WR の既存研究が多く見られる北太平洋航路における精度検証を行う．具体的には，予報時間別，季節別及び強風時において，世界を代表する気象機関である気象庁(Japan Meteorological Agency, JMA)，米国国立環境予測センターNCEP(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 及びヨーロッパ中期予報センター(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)の全球数値予報モデルの予測値の検証を行い，3 つの気象機関の予測値を相互比較することで海上風の予測傾向を明らかにするとともに，航路上で最も精度が高い予測値を明らかにする．

2. 使用データの概要

2.1 全球数値予報モデル GPV データ

海上風の予測値として，JMA Global Spectral Model（JMA-GSM），NCEP Global Forecast System（NCEP-GFS）及び ECMWF Integrated Forecast System（ECMWF-IFS）の全球数値予報モデルの格子点値（Grid Point Value，以降，GPV）を用いる．これらの GPV では，10m 高度の風速が 0.5°×0.5°の格子点上に配列された形で配信される．

本研究は著者らの研究プロジェクト「輸送の三原則を考慮した国際海上輸送システム創出の研究」が採択された年に開始されており，検証はその初年度にあたる 2008 年 1 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日の 1 年間を対象とした．12 UTC 初期値の 6 時間毎の予測値（JMA-GSM 96 時間予報以降については 12 時間毎）を使用して精度検証を行った．尚，現在では各気象機関の予測モデルに改良が加えられており，本研究の結果より予測精度が若干改善されていると考えられる．

2.2 海上風実況値データ

本研究では，上記 GPV 予測値を精度検証するための海上風実況値として，QuikSCAT 衛星による海上風推定値を用いる．QuikSCAT は 1999 年 6 月に NASA により打ち上げられた太陽極軌道衛星である．SeaWinds と呼ばれるマイクロ波散乱計を搭載しており，1800km の観測幅で同一地点を 1 日 2 回観測し，1 日で海氷を除く海面の 90%以上を観測する．周波数 13.4GHz のマイクロ波を海上に照射することで海面から得られる後方散乱係数を観測し，10m 高度の風速・風向を推定している．QuikSCAT による風速推定精度は二乗平均平方根誤差（Root Mean Square Error, RMSE）で 1-2m/s 程度[6] とされている．

QuikSCAT にはデータの処理段階により Level があるが，本研究では 0.25°×0.25°に格子点化された Level 3 product のデータを使用した．

2.3 検証海域及び手法

本研究では，中東航路として東京-スエズ運河を結ぶ航路，北太平洋航路として東京-サンフランシスコを結ぶ航路を想定して世界港間距離図表[7] を参考に検証を行う航路を決定した．中東航路をアラビア海，ベンガル湾，南シナ海，東シナ海の 4 海域，北太平洋航路を西太平洋，北太平洋，東太平洋の 3 海域に分け，その海域での統計値の平均をとることにより，各海域における風速の予測精度を評価した．検証海域及び検証格子点数を Fig. 1 に示す．

衛星の通過時刻が日により異なるため，本研究では予測値を日々の衛星の通過時刻に合わせて線形内挿した．また，観測値は，予測値の格子点に最も近いものを参照した．

3. 検証結果

3.1 予報時間別の精度

予報時間別及び季節別の予測精度検証において，予測誤差の評価を(1)式で示す RMSE で行った．但し，風速の統計値は平均風速の大小に影響を受けるため，(2）式で示される，RMSE を平均風速で正規化した百分率を用いて予測精度の評価を行った．

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum (F-O)^2} \qquad (1)$$

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \qquad (2)$$

ここで，F，O，N はそれぞれ，予測値，観測値，サンプル数であり，$\bar{O}$ は各海域で平均した観測値の年平均又は季節平均風速である．

各海域における予報時間別の風速の RMSE と QuikSCAT による年平均風速を Fig. 2 に示す．全海域において，予報時間とともに RMSE の値は大きくなっていることがわかる．24 時間後の予測値と 168 時間後の予測値の RMSE に最も差が出たのは北太平洋であり，風速で 30%以上低下している．その他の太平洋海域でも概ね 25%以上の低下が見られた．中東航路ではフィリピン海が最も RMSE の低下が大きいが，そこを含めても概ね 20%以下であり北太平洋に比べて全体的に差が小さい事が示された．航路別の平均値では，予報時間前半では北太平洋航路の RMSE は中東航路と殆ど同じであったが，96 時間予報以降は中東航路の精度が上回り 168 時間予報では

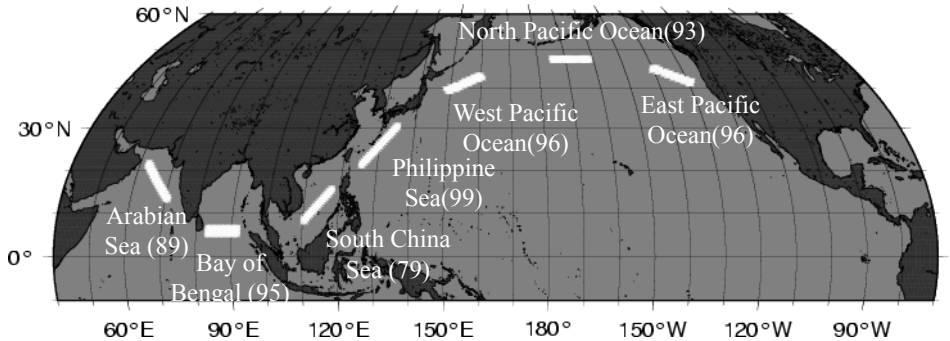


Fig. 1　7 areas for verification. Parenthetical values are the number of grid points for verification.

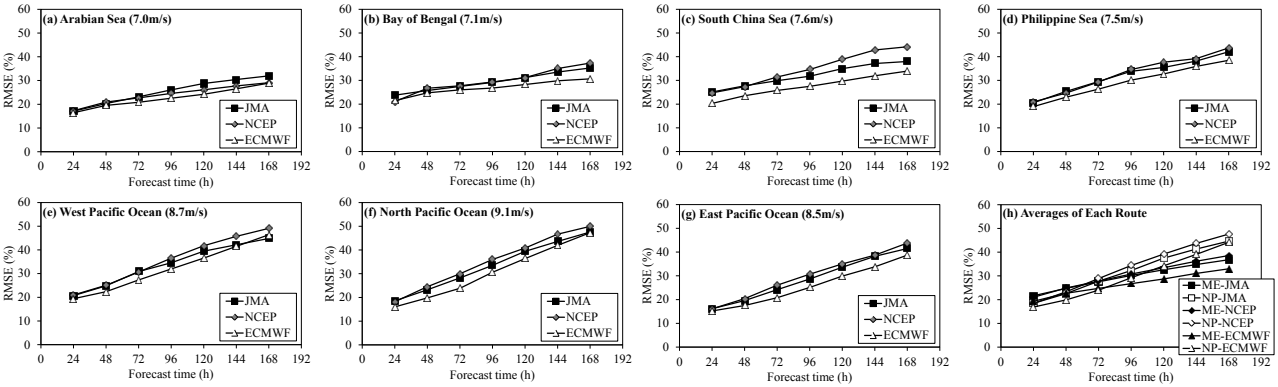


Fig. 2 RMSEs for wind speed in the 7 areas and the average for the Middle East (ME) and North Pacific (NP) routes, as a function of forecast time. Parenthetical value is annual mean wind speed in each area.

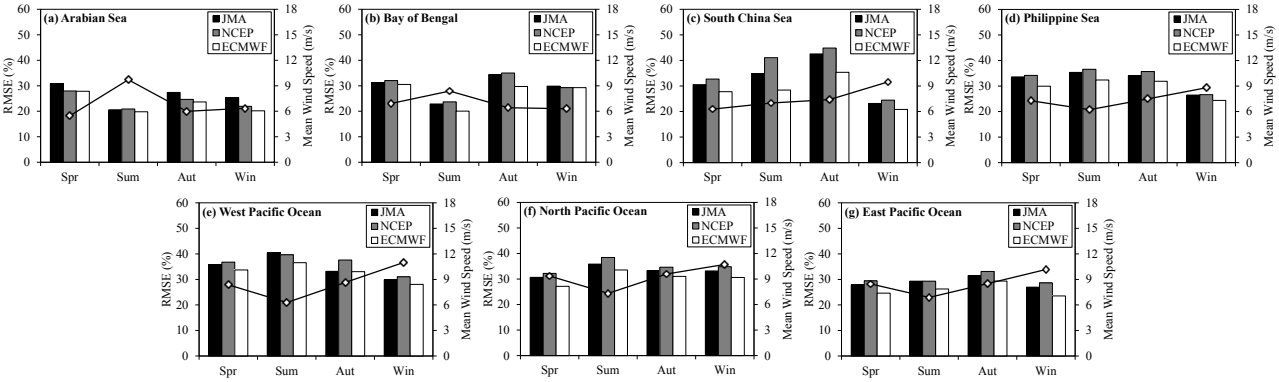


Fig. 3 RMSEs for wind speed (bars) and mean wind speed (line) for four seasons.

中東航路は北太平洋航路より 8%程度精度が高いという結果が得られた.

海域別に見て相対的に精度が高かったのは，予報時間前半では東太平洋とアラビア海であり，RMSE はそれぞれ 16%程度と 17%程度であった．予報時間の後半においてはアラビア海の RMSE が最も小さく, その値は 30%程度であった．また，RMSE が大きい値を示したのは予報時間前半では南シナ海とベンガル湾で 20%以上であり，予報時間後期では西太平洋と北太平洋において 45%以上であった.

JMA，NCEP 及び ECMWF を比べてみると，西太平洋の 168 時間予報において JMA が ECMWF より小さい RMSE を示したが, それ以外では ECMWF が JMA 及び NCEP の予測精度を上回った．また，アラビア海では NCEP，それ以外の海域では JMA が ECMWF に次いで高い精度を示した．各気象機関の RMSE に最も差が出た海域は南シナ海であり, NCEP と ECMWF の RMSE に最大 11%程度の差が見られた.

3.2 季節別の精度

予測精度の季節変化の傾向を見るために，年間の予測値を春（3-5 月），夏（6-8 月），秋（9-11 月），冬（1，2，12 月）の 4 つの季節に分けて精度検証した.

全予報時間を平均した季節別の風速の RMSE と QuikSCAT による季節平均風速を Fig. 3 に示す．季節別の比較では，中東航路 4 海域で平均風速が 1 年間で最も大きい季節に，他の季節より風速の RMSE が小さくなる傾向が見られた．アラビア海，ベンガル湾の夏は 20%，22%程度，南シナ海，フィリピン海の冬は 23%, 26%程度と, 中東航路の 4 海域では，各海域のモンスーンの卓越期に最も小さい RMSE を示している．北太平洋 3 海域では，季節による特徴は中東航路ほど顕著に表れず, 各海域の RMSE が最も小さい季節と大きい季節の差が最も大きい所でも 10%程度であった.

JMA，NCEP 及び ECMWF を比べてみると，3.1 節の結果と同様に，ほぼ全ての海域及び季節で ECMWF の精度が最も高い結果となった．また，各気象機関に特に差が出たのは，夏と秋の南シナ海で ECMWF の RMSE がそれぞれ 28%及び 35%程度であったのに対し，JMA は 35%及び 43%，NCEP は 41%及び 45%と，7%以上大きくなった.

3.3 強風時の精度

気象庁では，日本近海の海上において風速が 28

Table 1 Contingency table used to compute the score. *FO*, *FX*, *XO* and *XX* mean the number of combinations

Event = Wind speeds above 14m/s		Event observed	
		Yes	No
Event forecast	Yes	*FO*	*FX*
	No	*XO*	*XX*

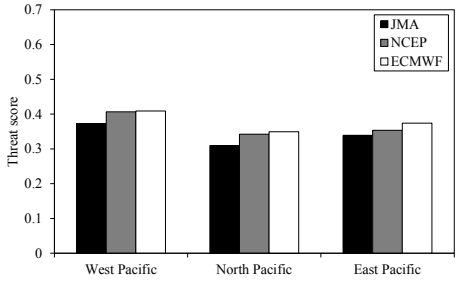


Fig. 4 Threat scores for West, North and East Pacific areas.

ノット（約 14m/s）以上に現在達しているまたは 24 時間以内に達する恐れがある場合，海上風警報を発表している．船舶の航行には強風時の風速がより重要であるため，ここでは 14m/s 以上の強風に対象を絞って議論を進める．

強風時の船舶の航行の観点からは，予測風速誤差だけでなく，海上強風警報の当たり外れについても検討する必要がある．ここでは風速 14m/s 以上の強風を対象に，その現象の有無から算出される(3)式のスレットスコア TH により検証を行う．

$$TH = \frac{FO}{FX + XO + XX} \left(0 \le TH \le 1\right) \qquad (3)$$

ここで，*FO*，*FX*，*XO*，*XX* は Table 1 に示す事象であり，*TH* の値が大きい事は精度が高い事を意味する． 北太平洋航路上の 3 海域における，全予報時間を平均した年間のスレットスコアを Fig. 4 に示す．3 海域の中では，北太平洋のスコアが最も小さく，JMA，NCEP 及び ECMWF のスレットスコアはそれぞれ 0.31，0.34 及び 0.35 であった．西太平洋においてはそれぞれ 0.37, 0.41 及び 0.41, 東太平洋では 0.34, 0.35 及び 0.37 であり，3 海域全てで ECMWF のスコアが JMA と NCEP を上回った．また，3.1 節で ECMWF に次いで JMA の精度が高い結果となったが，強風時には 3 海域全てで NCEP が JMA のスコアを上回る結果となった．

4. 結言

本研究では中東航路及び北太平洋航路において，JMA，NCEP 及び ECMWF の全球数値予報モデルの海上風予測値の精度検証及び比較を行った．主要な結論を以下に示す．

1. 中東航路及び北太平洋航路における海上風予測値について ECMWF の予測精度が最も高いことを明らかにした．
2. 予報時間別の検証において，予報時間に伴う風速予測精度の悪化傾向は，中東航路よりも北太平洋航路で顕著であった．
3. 季節別の検証において，中東航路ではモンスーンの卓越期に同海域の他の季節より顕著に精度が良くなる傾向が見られた．

謝辞

本研究は平成 20 年度に文部科学省で採択された運営費交付金特別教育研究推進「輸送の三原則を考慮した国際海上輸送システム創出の研究」の一環として実施された．

参考文献

(1) 高嶋恭子，加納敏幸，小林充：高精度の気象・海象予測データに基づく内航船の省エネルギー運航について，日本航海学会論文集，Vol.113，pp.99-106，2008.

(2) 西山尚材，庄司るり，大津皓平，メザウィブラヒム：ウェザールーティングによる大洋航路の検討, 日本航海学会論文集, 第 125 号, pp.153-164, 2011.

(3) 萩原秀樹：気象・海象の予測精度に基づく確率的なウェザールーティング，日本航海学会論文集，Vol.83，pp.155-167，1990.

(4) Bidlot, J.-R., D. J. Holmes, P. A. Wittmann, R. Lalbeharry, and H. S. Chen: Intercomparison of the Performance of Op-erational Ocean Wave Forecasting Systems with Buoy Data, Wea. Forecasting, Vol. 17, pp.287–310, 2002.

(5) メザウィブラヒム，庄司るり，田丸人意： ウェザールーティングに使用する気象・海象情報の精度向上についての一考察，日本航海学会論文集，Vol.122，pp.209-217，2009.

(6) Ebuchi, N., H. C. Graber, M. J. Caruso: Evaluation of wind vectors observed by QuikSCAT/SeaWinds using ocean buoy data, J. Atmos. Oceanic Technol., Vol. 19, pp.2049–2062, 2002.

(7) 日本航海士会：世界港間距離図表（2 訂版）．海文堂出版，170p.，1990.

内航船向け最適航海計画支援システムの開発について

学生会員○高橋　淑子（東京海洋大学）　　正会員　庄司　るり（東京海洋大学）
非会員　　松浦　邦明（日本気象協会）　　正会員　加納　敏幸（海上技術安全研究所）

要旨

近年、内航海運においても省エネ運航が求められており、経済運航は重要なテーマとなっている。2011 年に実用化された最適航海計画支援システムでは、高精度な気象海象予測情報を活用し、燃料消費量を最少とする経済運航が可能となった。著者らは、本システムにより求められる推奨航路において平均４％の FOC 削減効果を、また、燃料消費量実測値ベースでも、本システムを利用した航海において推奨値以上の FOC 削減効果を得られることを実証した。

キーワード：航海・地球環境、気象海象、燃費削減

1.諸言

これまで内航海運では、常用航路により早めに到着して沖待ちをする航海計画がしばしば用いられ、省エネルギーを考慮した航海は行われてこなかった。しかし、高精度の気象海象の予測情報を考慮した航路計画、予測の不確実性を考慮した船速計画（減速航行）を用いることで、経済的な運航（環境調和型の運航）が可能になる。

著者らは、内航船舶の航海時における燃料消費量の削減を目的として、船舶が遭遇する気象海象環境（海上風，波浪，海潮流）を精度よく予測するとともに、実海域での船舶推進性能を推定し、これらの情報に基づき最適な航海計画（燃料消費量が最小となる航路かつ定時性を維持した船速計画）を作成するシステムを実用化し、内航船舶７隻を対象に実証実験を実施し、その効果を評価した[1)]。

また、そのうち 2 隻については、その後も継続して長期にわたる効果の検証を行った。

2.システム概要

システムの概要を図 1 に示す。①ユーザーが船載機を用い、本船の常用航路、出発位置と日時、到着位置と日時、積載状態等を設定し、最適航海計画の作成をリクエストすると、船陸間通信を介し、JWA（Japan Weather Association：日本気象協会）サーバーに要求が送信される。②JWA サーバーは要求を受付けると、高解像度、高精度の日本周辺の気象海象予測情報、実海域船舶性能データに基づき、FOC（Fuel-Oil-Consumption：燃料消費量）が最小となる最適航路および到着予想時刻を計算する。要求に対

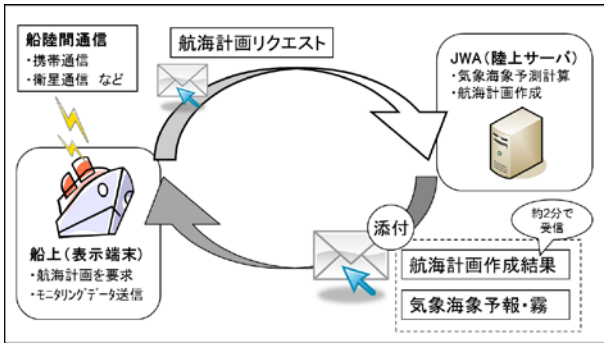


図 1　システム概要

する最適航海計画の結果は、船陸間通信を介して船載機に送信される。③算出された航海計画は、船載機の画面上で利用でき、常用航路と最適航路、更に最新の気象海象予測情報を重畳表示できる。これにより、船長の航海計画立案を支援する。

通信プロトコルはメールであり、計画要求、計算結果を添付ファイルとして送受信する。また、船舶からは、10 分毎に運航に関するモニタリングデータの送信を行っている。

船陸間通信には、通信コストが安価であることから、携帯通信を主に利用している。

3.要素技術

3.1　気象海象予測について

内航船における航海時間は、1～2 日、長くても 3 日程度と短い。また、航行区域が沿岸であるため、高密度な予測情報が存在するとともに、データ同化に用いることのできる観測データも多い。つまり、時空間解像度の高い高精度な気象海象予測を用いることができる。

表 1　気象海象予測モデルの概要

予測モデル　/　概要	
沿岸海上風 SYNFOS （日本気象協会）	局地気象モデル WRF により、解像度 5km で予測．GPS 過降水量を同化して、高精度化を図っている。
沿岸波浪 JWave （日本気象協会）	SYNFOS 海上風データに対応した第 3 世代波浪モデル（改良 WAM）。解像度 2 分。沿岸波浪観測データを同化し高精度化。
沿岸流況 JCOPE2 （JAMSTEC）	海流に加え、潮流・吹送流を解像度 1/36 度で予測．衛星、ブイ観測値を同化し、高精度化を図っている。
海　　霧 ひまわり霧情報 （日本気象協会）	MTSAT の複数チャンネルの観測結果から霧を判別。実況のみ。

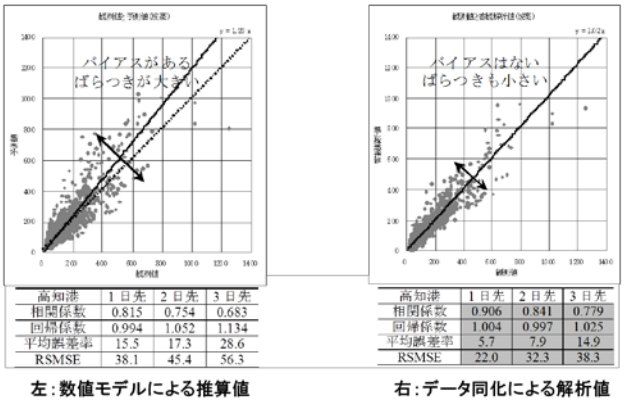


図 2　波浪精度検証結果（高知沖の例）

図 3　船舶性能推定手順

本システムで利用する気象海象予測情報を表 1 に示す。松浦ら[1] による 96 時間先までの気象海象予測情報であり、海上風、波浪、海潮流とも空間解像度は緯度経度 2 分、時間解像度は 1 時間の情報である。海霧については、石田ら[3] による手法を用い、気象衛星による準リアルタイム観測による霧現況情報を、約 30 分の更新頻度で提供を可能とした。

データ同化による予測精度向上の一例として、高知沖の事例を図 2 に示す。左が数値モデルによる推算値、右はデータ同化による解析値を示しており、データ同化によりばらつきが小さくなり、精度の向上が認められる。

表 2　各航路における FOC および削減効果の定義

用　語	定　義
常用航路の FOC	常用航路を航海した場合のシミュレーションによる FOC 推定値。要求到着時間内に到着する範囲で船速一定の最適な機関制御値を選択。
推奨航路の FOC	最適航路を航行した場合のシミュレーションによる FOC 推定値。要求到着時間内に到着する範囲で船速一定の最適な機関制御値を選択。
実航路の FOC	「通過位置」「通過時刻」「機関制御値」のモニタリングを入力としたシミュレーションによる FOC 推定値。
FOC 実測値	「燃料流量計積算値」モニタリングの出発・到着時刻の差分とした。航海シミュレーションの推定誤差の確認に用いた。
推奨航路の FOC 削減効果	常用航路に対する推奨航路の削減効果 Effect（%）とし，以下の式により算出した。 $Effect=100-(FOC_{RCMND}/FOC_{USUAL})*100$
実航路の FOC 削減効果	常用航路に対する実航路の削減効果 Effect_a（%）とした。 $Effect=100-(FOC_{ACTUAL}/FOC_{USUAL})*100$

3.2　船舶性能推定について

実海域における船舶性能データは、小林ら[2]の推定手法によるものを使用している。まず、船型資料等から船体パラメータを作成し、抵抗損失を推定する。風抵抗損失と風による回頭モーメントの推定には藤原法（成分分離モデル）、波浪抵抗損失の推定には丸尾法・藤井高橋法（海上技術安全研究所SPICAモデル）、平水中抵抗の推定にはログ船速計による実運航データを用いた。

その後、一定期間の運航モニタリングデータを使用して回帰分析を行い、求められた回帰係数を乗じた抵抗損失と、推進出力が釣り合うようにフィッティングを行う。（図 3）

3.3　航海計画演算手法について

燃料消費が最小となる最適航海計画の立案は、高嶋ら[4]のダイナミック・プログラミング（Dynamic Programming）を用いており、常用航路を中心に動的メッシュを生成し、気象海象予測、船舶性能を入力として各メッシュ間のFOCを算定し、FOCが最小となるメッシュの組み合わせを最適化計算で求める。

また、対象船舶の航行区域についても考慮し、航行不可区域は通航しない航路を選定する。

4.最適航海計画の FOC 削減効果

4.1　推奨航路の FOC 削減効果

本システムでは、本船の常用航路をベースとし、FOC が最小となる推奨航路を算出する。各航路における FOC と削減効果の定義を表 2 に示す。

本システム開発時における実証実験および継続実験の結果を表 3 に示す。航路選択の幅のある船舶で、平均 3.7%の FOC 削減効果を得ることができた。また、この効果は海域により異なり、黒潮や津軽暖流等の海流の影響を強く受ける海域での効果は特に高く、4.0%の削減効果となる。

4.2　実航路の FOC と FOC 実測値の比較と航海シミュレーションにおける推定誤差

本船は可能な範囲で推奨航路に沿った航海を行い、その航海結果が実航路となる。実航路における燃料消費量の定義および計算式は、表 2 に示す。

実航路の FOC は、モニタリングデータを入力値としてシミュレーションにより求められた値であり、FOC 実測値は、燃料流量計の実測値である。これらの値を用いて、船舶 H（関東～関西～沖縄を航行する RORO 船）に対してシミュレーション推定誤差の検証を行った。その結果、回帰係数は 0.98 とほぼ 1 に近く、実航路の FOC は FOC 実測値に比べ若干大きく推定される傾向にあり、決定係数は 0.99 と高かった。（図 3）

表 3　開発時の実証実験および継続実験の結果

船舶	船種	対象航海数	推奨航路におけるFOC削減効果（%）			
			東航北航	西航南航	平均	最大
A	セメント船	46	3.4	3.3	3.4	9.9
B	セメント船	67	5	3.6	4.3	13.7
C	貨物船	27	3.5	4.5	4	10.5
D	鋼材船	13	-	-	3	8.3
E	RORO船	43	4.4	4.1	4.3	8.3
F	フェリー	30	2.7	0.9	2	4.8
G	RORO船	71	1.5	0.7	1.1	4.1

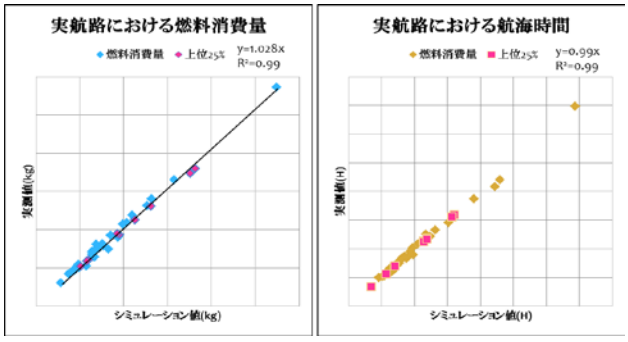


図 3　航海事例（推奨航路を参考としない場合）

以上から、本システムでは数%の誤差範囲で FOC の推定ができ、得られた回帰係数でモデルを補正することで、統計的にみて正しい燃料消費量の推定ができると言える。

また、尤度関数を用い、解析のためのサンプル数として 20 航海を超えると統計的に安定した結果を示すことを確認した。

4.3　航海事例（推奨航路を参考とした場合）

本システムによる推奨航路を参考とした航海事例として、船舶 H における大阪－東京間の順潮航路の航海結果と、その際の海潮流の状況を図 4 に示す。

この事例では、黒潮の流軸を捉えた航路が推奨されており、FOC 削減効果は 1.5%であった。実際に推奨航路に沿って航海した結果、実航路でも黒潮の流れにより低出力でも速力の出る航海となり、削減効果は 16.5%であった。

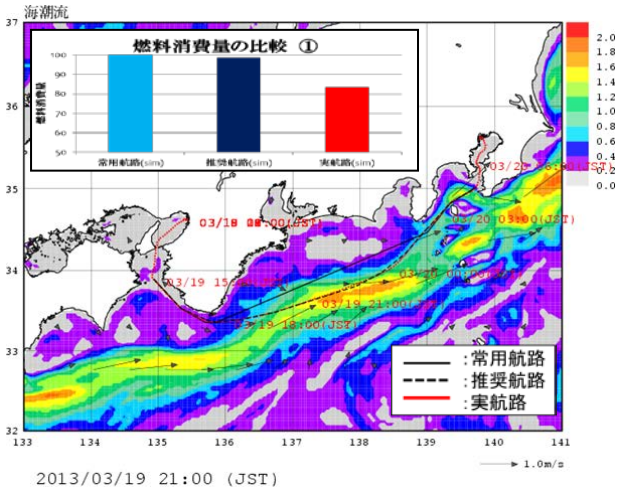


図 4　航海事例（推奨航路を参考とした場合）

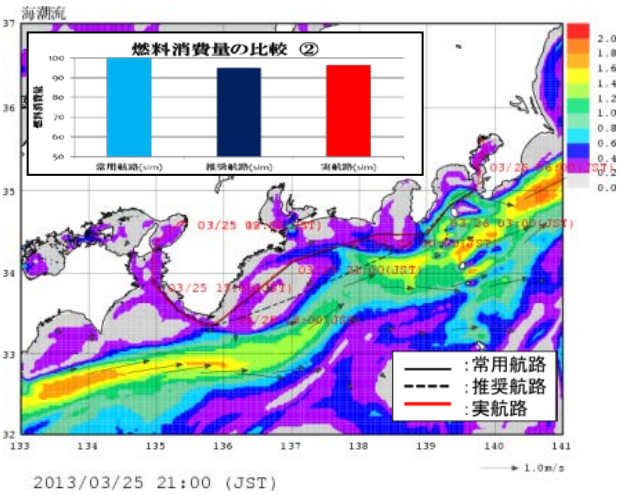


図 5　航海事例（推奨航路を参考としない場合）

4.4 航海事例（推奨航路を参考としない場合）

本システムによる推奨航路を参考としなかった航海事例として、4.3 と同じ船舶 H における大阪－東京間の航海結果と、海潮流の状況を図 5 に示す。

この事例でも、4.3 ほどではないが、推奨航路は黒潮の流軸近くを選択している。また、航程のショートカットによる効果も期待できる航路であり、削減効果は 5.0%であった。しかし、常用航路を航海したことで、実航路では 3.5%と、推奨値以上の FOC 削減には繋がらない結果であった。

4.5 推奨航路および実航路の FOC 削減効果

船舶 A、B および H における推奨航路の FOC と FOC 実測値における FOC 削減効果の比較表を、表 4 に示す。いずれの航海も、推奨航路に比べて FOC 実測値の方が、FOC 削減効果が高い結果であった。このことより、航海時に本システムにより推奨される航海計画を参考にすることで、より高い FOC 削減効果を得られることが実証できた。

また、特に大きな FOC 削減効果が得られる航路は、黒潮の影響が大きい関西、九州、沖縄航路であった。傾向としては、東航では黒潮を利用して低出力で船速を保持する航路を、西航では逆潮による速力の低下を最小限に抑えた航路を推奨し、低出力航海の実現により、FOC 削減に繋がったと考えられる。

表 4　推奨航路の FOC 削減効果と FOC 実測値

船舶	船種	航路	推奨航路における FOC削減効果			FOC実測値における FOC削減効果		
			航海	平均	最大	航海	平均	最大
A	セメント船	九州	72	2.8	9.7	9	3.3	10.0
B	セメント船	九州	89	5.2	14.4	59	6.4	40.0
H	RORO船	関西	20	1.3	5.0	20	4.1	16.5
H	RORO船	沖縄	21	1.6	2.8	21	3.7	10.3

5.結論

本研究では、内航船向け最適航海計画支援システムを実用化し、内航船 7 隻を対象に実証実験を行った結果、推奨航路において平均 4%の FOC 削減効果を得ることができた。

さらに、3 隻の船舶を対象に、運航モニタリングデータを用い実航路における FOC 削減効果の検証を行った結果、全船において推奨航路を上回る FOC 削減効果が得られることを確認した。

本システムは「わずかな航路の差の積み重ね」で FOC の削減効果を得るため、気象海象予測精度、船舶性能推定精度が FOC 推定精度に大きく影響する。

また、本システムにおける FOC 推定誤差を検証した結果、高い精度で FOC の推定を行えることを確認した。得られた回帰係数を用いモデルを補正することで、統計的に正しい燃料消費量の推定が行える。

この航海計画支援システムは、ソフトウェアであることから、多くの改修費や時間を要することなく、既存船舶に対しても適用が可能であり、広く実用化を図ることができる。

謝辞

本報告内容は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の実用化研究開発「内航船の環境型運航計画支援システムと陸上交通情報連携に関する実用化研究開発」として一般財団法人日本気象協会、独立行政法人海上技術安全研究所、国立大学法人東京海洋大学が協同で実施した結果の一部、および本研究にて開発したシステムの運用結果の一部となります。

実証実験では、多くの船社、船舶乗組員の皆様に、多大なご協力をいただきました、また、運用後の運航データ提供には、宇部興産海運株式会社、琉球海運株式会社に、データ解析には特定非営利活動法人マリン・テクノロジストにご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

(1) 松浦邦明・佐藤淑子・加納敏幸・小林充・瀬田剛広・大津皓平・庄司るり・高嶋恭子：環境調和型航海支援システムの構築と実証実験，日本船舶海洋工学会講演論文集，第 12 号，2011，ROMBUNNO.2011S-OS3-8.

(2) 小林充・加納敏幸・松浦邦明・佐藤淑子：環境調和型航海支援システムのための船舶性能推定と実証実験の検証，日本船舶海洋工学会講演論文集, 第 12 号, 2011, ROMBUNNO.2011S-OS3-9.

(3) 石田春磨・中島孝・下田陽久・鈴木靖・後藤あずみ：気象衛星 MTSAT-1R による霧検出手法の開発，社団法人日本気象学会大会講演予講集，第 94 号，2008，pp.517.

(4) 高嶋恭子，加納敏幸，小林充：高精度気象・海象予測データに基づく内航船の省エネルギー運航について,日本航海学会論文集，第 118 号，2008, pp.99-106.

北極海航路における海氷分布特性

正会員　○嶋田　陽一（神戸大学）

要旨

海氷データを用いて北極海航路上における海氷分布特性を調べた。毎年、北極海航路上の海氷がほとんど消滅する最後の海域は、タイミル半島周辺及びノヴォシビルスク諸島周辺の海域である。その海域は全体の1 割程度である。北極海航路上のゼロである海氷密接度と北極海の海氷面積の時間変動は逆位相であるが、北極海の海氷面積の極小と北極海航路上のゼロである海氷密接度の極大の経年変動は必ずしも対応していない。

キーワード：航海・地球環境、北極海、海氷

1. 緒言

北極海における海氷減少傾向である現在において、航海時間及び燃料消費量を節約するために、北極海航路の航行が期待されている。嶋田[(1)]は再解析データを用いて北極海における海氷減少傾向期における北極海航路の航海シミュレーションを実行し、海氷減少傾向の北極海における船舶の航行可能性を調べた。航行可能な海氷密接度の上限値を最も低くした航海シミュレーションでは、北極海航路の開通期間は 8 月下旬から 9 月下旬まであるが、年によって開通期間に不連続性があることを示した。東方面の航海において､船舶が東経 90 度辺りの海域を通過できれば、北極海航路を通過する傾向を示した。一方、西方面の航海において、船舶が東経 150 度辺りの海域を通過できれば、北極海航路を通過する傾向を示した。このようにカラ海東部・東シベリア海西部付近における海氷分布の重要性を示唆されたことから、本研究では、海氷データを用いて北極海航路上における海氷分布特性を調べる。

2. 実験概要

本研究で用いる北極海航路は嶋田[(1)]と同じ航路とする。この航路は LNG 船がノルウェー北部のハンメルフェストを出港し、北極海航路を東方にとり、ベーリング海峡を通過した実際の航路を参考にした[(2)](図 1)。

海氷データについては NOAA の OISST version2 AVHRR の海氷密接度を用いた[(3)]。解析期間は 2007 年から 2011 年とする。

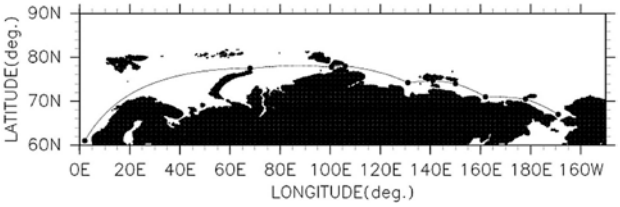


図 1　北極海航路

3. 結果

北極海航路上における海氷分布の時間変化をみるために、図 2 に北極海航路上における海氷密接度の時間変化を示す。毎年、北極海航路上の海氷がほとんど消滅する最後の海域は､タイミル半島周辺(東経 100 度付近)及びノヴォシビルスク諸島周辺(東経 140 度付近)の海域である。他の海域と比較して、ノヴァヤゼムリャ島周辺(東経 40 度～60 度)における海氷の経年変動は著しい。北極海航路は海氷に覆われる時間は、海面が海氷から露出する時間よりも早い傾向を示す。

これら結果より、タイミル半島周辺及びノヴォシビルスク諸島周辺海域における海氷状況の把握は、北極海航路開通のトリガーとして重要であることが海氷データから推察できる。特にタイミル半島周辺における海氷は広範囲に及ぶので、砕氷船によるエスコート支援の依存性が高く、安全航行のためにモデル・観測体制の構築が重要であることが示唆される。

海氷がない海域が北極海航路上にどれくらい占めるのかを調べるために、北極海航路上において海氷密接度がゼロ(ゼロ海氷密接度)である海域の比率の時間変化を図 3 に示す。各年ともゼロ海氷密接度の最大が約 9 割以上となる。2007 年はゼロ海氷密接

度が約 9 割になる期間が他の年よりも幾分長い。上記の北極海航路上の海氷がほとんど消滅する最後の海域は全体の 1 割程度であり、安全航行のために、この程度の広さの海域における海氷分布を監視する必要性があることが示唆される。

北極海全体と北極海航路の海氷分布を比較するために、図 4 に北極圏海氷モニターが提供する北極海の海氷面積の経年変化を示す。ただし、その極小部分の変化を切り出した．北極海航路上のゼロ海氷密接度の極大であれば北極海の海氷面積の極小であることを確認できる。しかし、極値をみると、北極海の海氷面積の極小値と北極海航路上のゼロ海氷密接度の極大値は必ずしも対応していないことがわかる。講演時には詳細な解析について報告する。

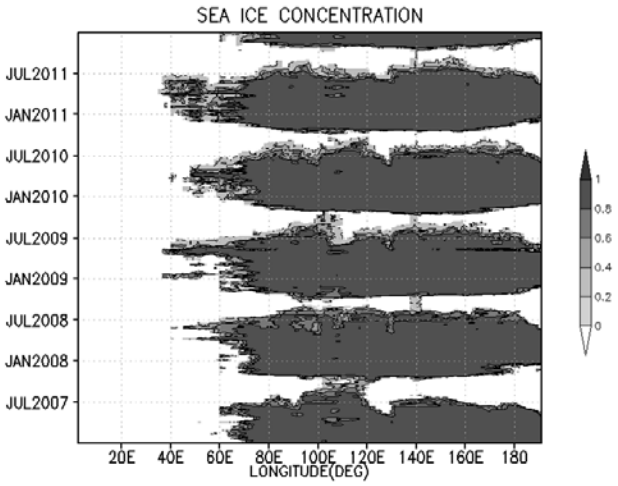


図 2 北極海航路上の海氷密接度の時間変化

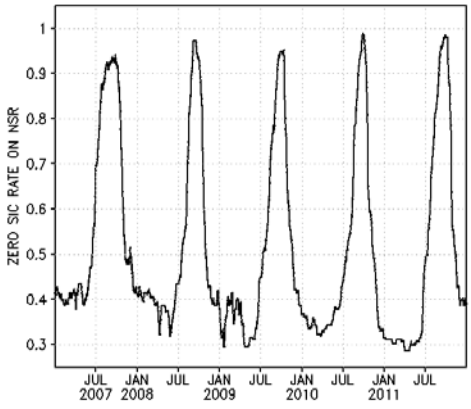


図 3 北極海航路上のゼロ海氷密接度の比率

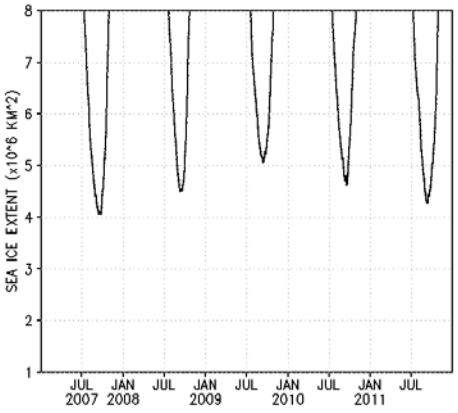


図 4 北極海の海氷面積（極小部分）

謝辞

本研究は、日本学術振興会若手Ｂ「海氷減少化傾向の北極海における船舶の最短航海時間航路選択に関する基礎的研究」（課題番号：2575012）によって行われた。

参考文献

(1) 嶋田陽一: 北極海航路航行可能性に関する基礎的研究: 航海シミュレーション, 第 129 回講演会, 日本航海学会講演予稿集, 1 巻 2 号, p.75-78, 2013.

(2) 日本国際問題研究所：北極のガバナンスと日本の外交戦略, pp.97, 日本国際問題研究所, 2013.

(3) Cavalieri, D., C. Parkinson, P. Gloerson, H.J. Zwally: Sea ice concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I passive microwave data, Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center, 1996, updated yearly.

操縦運動時における船首沈下の推定に関する研究

学生会員○奥田　晃生（広島大学）　正会員　佐野　将昭（広島大学）

要旨

浅水域での船首沈下は触底、それに起因する油の流出といった海洋汚染につながることから船舶港湾関係者の重大な関心事となっている。そのため多くの半実験的手法による推定式が発表されているが、一般に操縦運動による影響は考慮されていない。操縦運動によって船首沈下量が変化するとの実験例もあるが、船体表面圧力との関連性など未解明な部分もあり、現象を把握する必要があるように思われる。そこで本研究では斜航角、旋回角速度、水深喫水比を系統的に変化させて CFD 計算を実施し、それらが船首沈下へ及ぼす影響について検討を行った。

キーワード：航路、浅水域、船首沈下、CFD

1. 緒言

浅水域を航行するとき、外洋航行時に比べ船体沈下量やトリムが増加することはよく知られている。触底及びそれを起因とする油の流出といった海洋汚染を防止するため、航路設計基準[(1)]においても、水深決定には船首沈下の影響を考慮することが定められている。一般にその予測には、船の主要目をパラメータとした実績のある簡易推定式が用いられるが、直進状態で評価されており、斜航・旋回といった操縦運動の影響は考慮されていない。しかし操縦運動時に船首沈下量が変化したという実験例[(2) (3)]もある事から、航行安全上、船首沈下に及ぼす操縦運動の影響を把握することは重要と思われる。そこで本研究では、オープンソースCFD[(4)]を活用し、船体表面圧力分布と関連付けて、斜航・旋回時における船首沈下量の推定を試みた。

2. 定常旋回問題適用への取り組み

定常旋回問題を船体固定座標系で解くため、ソルバー内の Navier-Stokes 方程式（空間固定座標系）の外力項に、船体運動による慣性力$\vec{f}$を新たに付加した。

$$\vec{f} = -2\vec{\omega} \times \vec{v} - \vec{w} \times (\vec{w} \times \vec{r}) \qquad (1)$$

ここで右辺第 1 項はコリオリ力、第 2 項は遠心力による慣性力を表し、$\vec{v}$は流体粒子の速度ベクトル、$\vec{r}$は流体の位置ベクトル、$\vec{\omega}$は渦度ベクトルである。また船体固定座標系で旋回流を表現する為、流入境界条件を式(2)のように設定し、船に旋回流が流入してくる状況に置き換えて解析を行った。

なお$\overrightarrow{r_0}$は流入境界の位置ベクトルである。

$$\overrightarrow{V(r_0)} = -\vec{v} - \vec{w} \times \overrightarrow{r_0} \qquad (2)$$

3. 推定精度の検証

CMT 試験（Circular Motion Test）を再現し、斜航・旋回運動時の操縦流体力について、計算精度の検証を行った。

3.1　供試船および計算条件

供試船にはKVLCC2 を用い、縮尺 1/110 模型船サイズで計算を行った。実船主要目を表 1 に、船体外観図（解析用モデル）を図 1 に示す。水深(h)喫水(d)比はh/d=1.5 と 1.2 とし、実船で 7(kn) 相当（F_n=0.064）の十分な低速域に設定した。このため、自由表面は鏡像面で置き換えて解析を行った。計算には粘性非圧縮の定常ソルバーを用い、乱流モデルはMSAモデル[(5)]を使用した。計算で使用した総セル数は約 300 万である。

表 1　供試船主要目

L_{pp}(m)	B(m)	d(m)	V(m^3)	C_b
320	58.0	20.8	313000	0.81

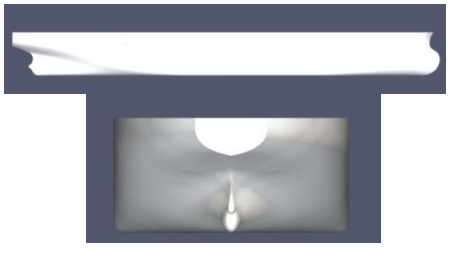


図 1　供試船外観図

3.2　計算結果・考察

図 2 にh/d=1.5、1.2 における計算結果(Cal.実線)と実験結果[6] (Exp.点)の比較を示す。縦軸は船体に作用する前後力X、横力Y、回頭モーメントNの無次元流体力X', Y', N'、横軸は斜航角βである。N'の定量的な推定精度に改善の余地はあるが、計算結果は実験結果の傾向を概ね再現できている。特に水深が浅くなるとY'とN'が急増する、浅水影響が明確に捉えられている事が分かる。

4. 操縦運動時の船体沈下・トリムの推定

4.1　船体沈下量とトリム量の算出

船体沈下量ζ、トリム角θは文献[7]を参照すると、船体に作用する上下力F_z、トリムモーメントM_yと同じオーダーとなる浮力変化項との釣り合いより、式(3)で定義できる。ここで$B(x)$は船の各断面幅である。またトリム角θとトリムTは式(4)の関係にある。

$$\left.\begin{aligned} -\rho g \int_L (\zeta - x\theta) B(x)dx + F_z = 0 \\ \rho g \int_L x(\zeta - x\theta) B(x)dx + M_y = 0 \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

$$T = L_{pp} \tan\theta \quad (4)$$

4.2　斜航状態における推定

β=0, 5, 10, 15, 20 (deg)における船体沈下量ζ、トリム T の推定結果を図 3 に示す。数値は船長に対するパーセント表示である。船体沈下量は鉛直下向き、トリムは船尾トリムが正である。横軸は喫水水深比 d/h であり、水深は深水域から h/d=1.2 までの計 4 点を対象とした。浅水域では斜航角の増加に応じ沈下量、船首トリムの増加が顕著にみられる。

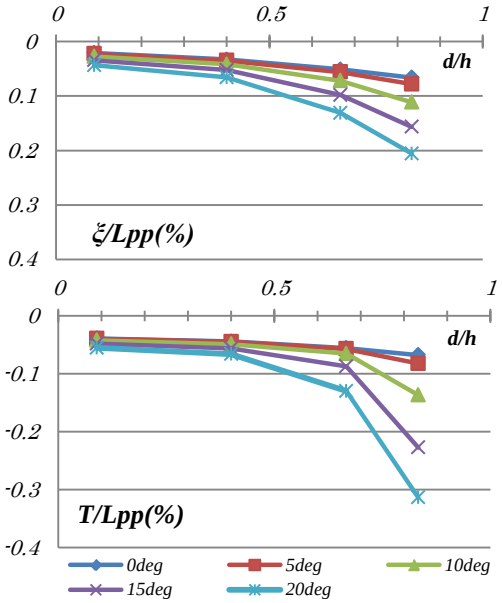


図 3　斜航時における船体沈下量(上)・トリム(下)の変化

図 4 に h/d=1.2 における縦軸に船長方向の各断面位置における上下力(下向きが正)の無次元値$\Delta Z'$をとった上下力分布曲線を示す。横軸は A.P.が 0、F.P.が 1 である。斜航角の増加により x 軸と分布曲線に囲まれた面積が広がっており、下向きの力が増大していることが分かる。特に船首部ではピーク値増大がみられ、分布の前後非対称性が強くなり船首トリムが大きくなったと推測できる。β=0,10(deg)における船底の圧力コンター図を図 5、流線分布を図 6 に示す。斜航時には船首 face、back 両側において前肩部からの剥離によると思われる強い負圧域が確認できる。このことからも斜航時には船首トリムが増大することがわかる。

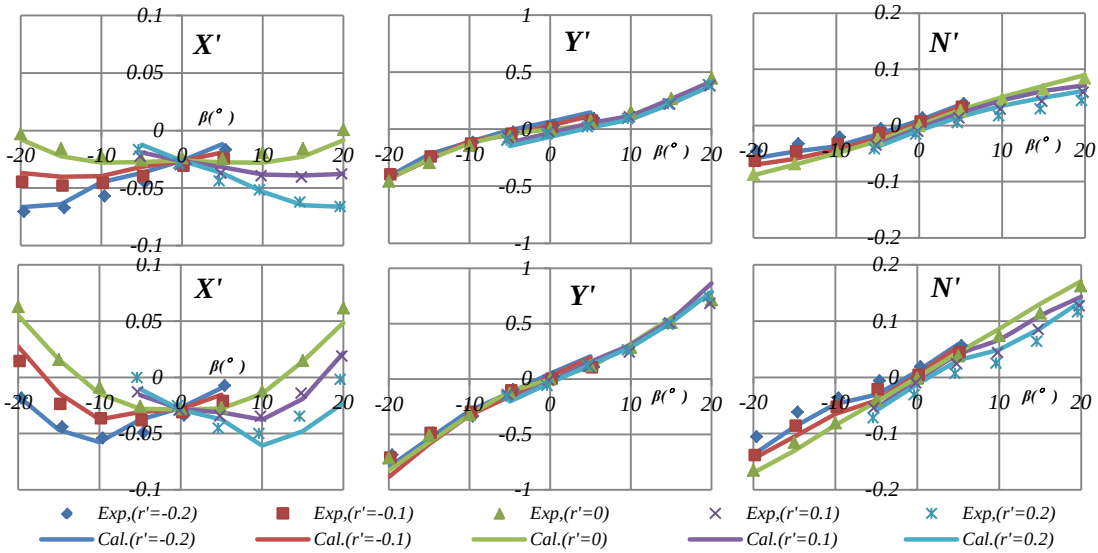


図 2　CMT 計算結果と実験結果の比較 (h/d=1.5(上)、h/d=1.2(下)における流体力係数)

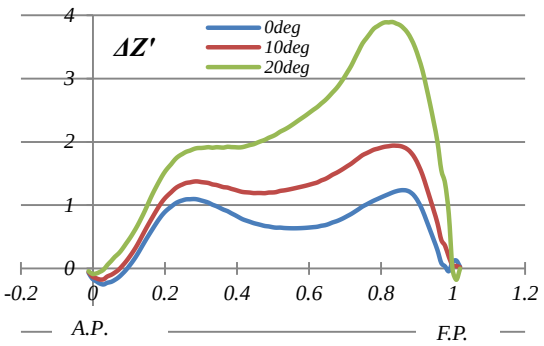


図 4　h/d=1. 2、β=0, 10 , 20 (deg) における上下係数分布曲線

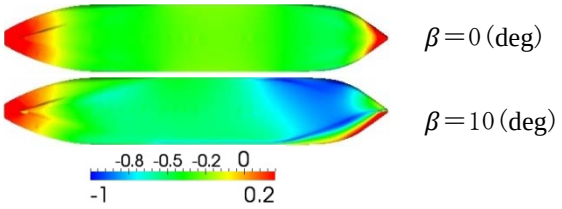


図 5　h/d=1. 2、β=0, 10 (deg) における圧力係数分布

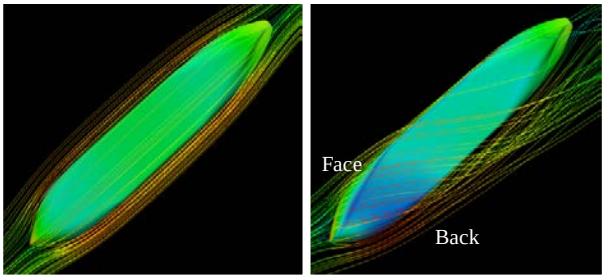


図 6　h/d=1. 2、β=0, 10 (deg) における流線

4. 3　旋回状態における推定

r'=0, 0. 1, 0. 2、β=0 (deg) における船体沈下量及びトリムの推定結果を図 7 に示す。直進時に比べ旋回時には沈下量がわずかに増加し、トリムについてはわずかに減少しているが、今回想定した r'=0. 1, 0. 2 程度の旋回時であれば船体沈下量、トリムに直進時と大きな変化は見られないことが分かる。

続いて h/d=1. 2、r'=0, 0. 2、β=0 (deg) における上下力分布曲線を図 8、圧力コンター図を図 9 に示す。図 8 より旋回時には船体中央付近から船尾部にかけて、下向きの力が直進時に比べて、わずかに増加するものの、斜航時に見られた船首部のピーク値の増大は見られない。また定常旋回時には船体を横断する cross flow が船体前半、後半部それぞれから流入している。このため図 9 に示すように船首部に加え、船尾部の船底にも剥離渦によると思われる強い負圧域が見られることからも確認できる。

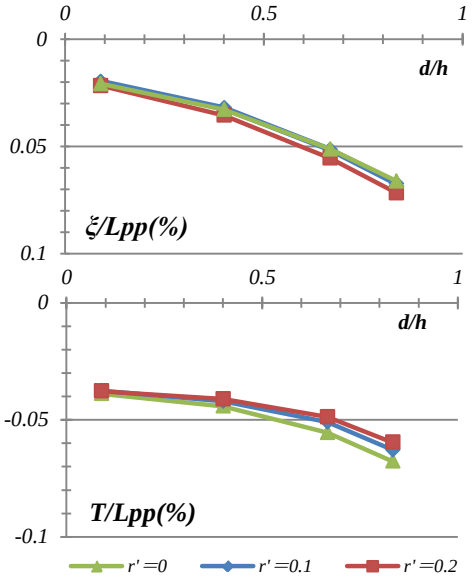


図 7　旋回時における船体沈下量 (上)・トリム (下) の変化

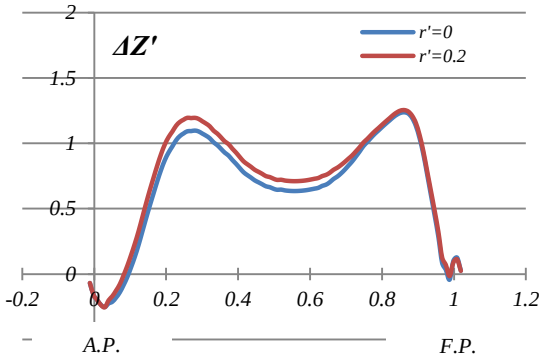


図 8　h/d=1. 2、r'=0, 0. 2、β=0 (deg) における上下係数分布曲線

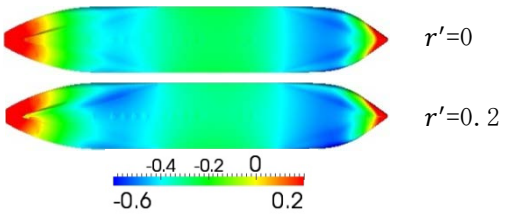


図 9　h/d=1. 2、r'=0, 0. 2、β=0 (deg) における圧力係数分布

4. 4　操縦運動時の船首沈下量

重心位置での船体沈下量に船首トリムによる影響を加算した、船首位置 (F. P.) における斜航・

旋回時の沈下量を図 10 に示す。数値はL_{pp}=320 (m) の実船換算とし、h/d=1.2 である。斜航単独時には斜航角の増加により船首沈下量の単調な増大がみられるが、斜航旋回時には斜航角に対し船首沈下量は単調な増加を示していない。

ここで船首部船底と水底間の余裕水深に着目すると直進時に比べβ=10 (deg) では約 13 %、β=20 (deg) では約 27%減少がみられる。増分は最大でも 80 (cm) 程度ではあるが、この時の余裕水深が 4.16 (m) であることを考慮すると余裕水深減少の観点からは注意に値すると思われる。文献(1)より港内航路の必要水深は、対象船舶の最大喫水の 10%とされており、この場合さらなる余裕水深の減少が予想される。

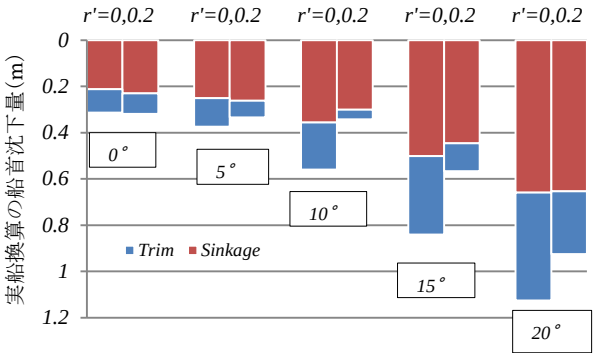


図 10　斜航旋回時における船首沈下量

4.5　船型間の比較

比較対象船の実船主要目を表 2、外観図を図 11 に示す。本節では KVLCC2 を S-Cb81 と称し S-Cb87 とは方形係数が異なる。KCS はコンテナ船である。斜航時の船首沈下量を図 12 に示す。数値はL_{pp}により無次元化し、h/d=1.2 である。まず S-Cb81 と KCS を比較すると方形係数の小さな KCS の船首沈下量が小さくなっている。S-Cb81 と S-Cb87 を比較すると直進時、斜航時ともに船首沈下量に大きな差は見られない。船型に依存するため一概には言えないが、将来的にC_b=0.87 程度まで肥大したとしても船首沈下はさほど大きくは変化しないと考えられる。

表 2　比較対象船の主要目

	S-Cb81	S-Cb87	KCS
L_{pp} (m)	320	320	230
B (m)	58	58	32.2
d (m)	20.8	20.8	10.8
V (m³)	313000	336000	52030
C_b	0.81	0.87	0.65

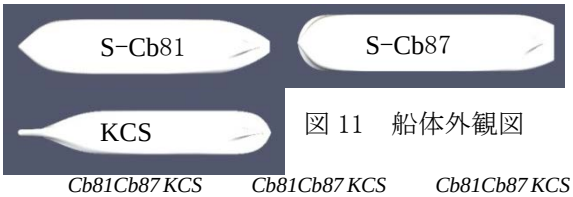


図 11　船体外観図

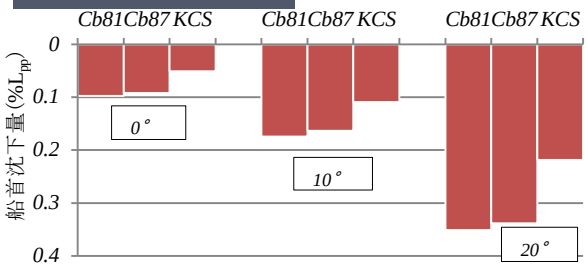


図 12　斜航時における 3 船の船首沈下量

5. 結言

オープンソース CFD を定常旋回問題に適用すべくソルバー改良を行い、浅水域での肥型船の操縦流体力の実験結果との比較によりその有用性を確認した。続いて斜航・旋回時の船体沈下量、トリムの推定を行い、斜航角、旋回角速度が船首沈下へ及ぼす影響を明らかにした。操縦運動時の余裕水深減少には注意を払う必要があると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり多くの助言を賜りました安川宏紀教授、田中進准教授に御礼申し上げます。

参考文献

(1) 国交省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007.
(2) 湯室彰規：浅水域における船の操縦流体力に関する模型実験, 石川島播磨技報, 第 25 巻, 第 4 号，pp. 203-209，1985.
(3) K.Eloot et al : An overview of squat measurements for container ships in restricted water，Proc. of SOCW2008，Glasgow，pp. 106-116，2008.
(4) OpenFOAM，The open source CFD toolbox Version 2.1.0，http://www.openfoam.com，2014.3.15.
(5) Hirata, N. and Hino, T.：A comparative study of zero- and one-equation turbulence models for ship flows，J. of the Kansai Society of Naval Architects，japan，No. 234，pp. 17-24，2000.
(6) 佐野将昭他：浅水域における肥型船の操縦流体力特性について, 日本船舶海洋工学会, 平成 24 年春季講演会論文集，CD-R，2012.
(7) 梅田直哉：高速漁船の航走時姿勢変化について, 関西造船協会誌, 第 196 号，pp. 9-17，1985.

航法と航海計器の関係についての一考察（国際VHF無線電話を中心として）

学生会員　○脇田礼三（神戸大学）　正会員　藤原紗衣子（神戸大学）
正 会 員　藤本昌志（神戸大学）

要旨

現行の海難審判制度では、「追越し船の航法」「行会い船の航法」「横切り船の航法」といった定型航法違反、もしくは「船員の常務」違反といった「航法違反（不遵守）」を衝突の原因としている。従って、航海計器の不具合や操作ミスに関しては、事件発生に至る過程で関与した事実としては認められても、事件の主たる原因として取り扱われることはない。しかし近年、航海計器は急速に発達し続けており、航海計器による情報が航海士の操船決定に及ぼす影響は、年々、拡大しているものと推測される。

そこで、本論文では、古くから有効性が認識されながら、COLREGsには組み込まれていないVHFに焦点を絞り、いくらかの海難事例を取り上げながら、航法（航海士の操船決定及びCOLREGsの遵守）と航海計器の関係について考察することとする。

キーワード：法規、VHF、COLREGs

1. 研究の背景と目的

近年、航海計器の発達は目覚ましいものがあり、航海士に対してどのような教育実施するかについては、様々な議論[(1)]がなされている。レーダー、国際 VHF 無線電話（以下、VHF とする。）、自動衝突予防援助装置（以下、ARPA する。）、自動船舶識別装置（以下、AIS とする。）、電子海図情報表示装置（以下、ECDIS とする。）といった計器類は、今や航海士における操船時の意思決定に際して、無視することができないほど大きな役割を果たしていると言える。しかし、レーダーを除く計器類に関しては、「国際海上衝突予防規則（以下、COLREGs とする。）」に使用の指針が示されていない。他方、AIS については、国際海事機関（以下、IMO とする。）が、COLREGs ではなく「海上における人命の安全のための国際条約（以下、SOLAS とする。）」において、指針を示したことは、衝突予防における AIS の在り方において混乱を生じさせたとの指摘もある[(2)]。

本稿では、航法規定と航海計器の関係について、VHF に焦点を絞って、論考する。

２．国際ＶＨＦ無線電話の有効性と危険性

日本においては、1973 年から、VHF の CH13 が水先人の操船用として許可された。これが操船用携帯局として廃止されたため、1980 年 12 月から、VHF の CH15、CH17 の 2 波が許可されることとなった[(3)]。

2008 年 2 月に発生した護衛艦「あたご」と漁船「清徳丸」の衝突事故で、船舶間で共通に利用できる無線電話システムが無いことが、海難防止の妨げの一因であると指摘された[(4)]。総務省は、当該衝突事件を契機に、船舶間で共通に使用することができる通信システムを早急に普及させることとした。これは、危険回避行動等の連絡を相互に取り合い衝突を避けることが目的であるが、国際的な避航方法を定めた COLREGs と、船舶間相互通信の使用により 2 船間で合意された避航方法との関係については、明らかにされていない。例えば、2 船間の合意が、COLREGs に反するものであれば、2 船間においては有効な避航動作であろうとも、第 3 船にとっては危険な行動になり得る。広い海域において、COLREGs を遵守することによってのみ船舶間の安全が担保されることを考えるならば、安易な VHF 交信は、COLREGs からの離反を促すことにつながり、船舶間の危険を増進させる危険性がある。

このように VHF の利用については、有効性と危険性の両側面から論究する必要があり、本稿は、COLREGs からの離反と見做されるような VHF での合意について、重点的に論考する。

３．海難審判裁決録からの検証

平成 19 年 1 月から平成 23 年 12 月までの海難審判裁決録より、漁船やプレジャーボートといったVHF の設置義務がない船舶を除き、2 船以上が衝突した事件から、VHF に関する記述がある事例を抽出した。5 年間で、一般貨物船等同士の衝突事故は、161 件あり、その中で裁決の文中に VHF が記述され、2 船間で通信を取り合おうとした裁決例は、12 件であった。そのうち、相手が応答しなかったが相手に伝わっていると信じた結果衝突したものが 5 件、互いに連絡をとったが、避航に関して意思疎通を図ろうとしなかったため衝突したものが 4 件、合意・了解を得たがその動作をとらなかったために衝突したものが 3 件であった。

また、2 船とも VHF を持っていたが使用せず、「原因の考察」の中で「VHF」を使用すべきであったとされたものは 5 件であった。

本稿では、「合意を得たが、その動作をとらなかった 3 件」から、海上衝突予防法第 15 条横切り船の航法が適用された、「貨物船アルファアクション（以下ア号）貨物船ワンハイ 307（以下ワ号）衝突事件」について一例として検討する。

海難審判では、「原因の考察」において、両船の VHF 交信が「切迫した状況」でとられていることから、「原因判断の対象として妥当ではない」としている。距離 1.2 海里の時点ではア号は最前の協力動作をワ号は避航動作をとる以外に手段はなく、それ以外の動作（VHF 交信）は、有効には働かないことから、原因として考慮する必要はないというものである。この判断について、筆者らはいくつかの疑義を抱いた。

まず、距離 1.2 海里を「切迫した状況」と認定した点についてである。実際に、ア号が「もはや衝突を避けることができないと判断」したのは、01 時 52 分半距離 0.7 海里の時点においてである。海域や船種により一概には言い切れないが、両船の距離 1.2 海里を「見合い関係成立」時点と定める例[5]もあり、両船の距離 1.2 海里での VHF 交信が時間的距離的な観点から無効であったとは言い切れないであろう。（注:衝突のおそれの適用し始める距離は、状況、特に接近する速度にかかわることが大きい[6]とされている。）

二点目は、真に「切迫した状況」であるのであれば、RULE2b（海上衝突予防法第 38 条）の適用範疇になり、COLREGs（海上衝突予防法）からの離反が許されることになる。「右舷対右舷」の交渉が、「切迫した状況」の中でとられたのであれば、VHF 交信の時期や内容について海難審判が成否を見定めることは意味をなさない。なぜならば、「衝突のおそれ」から「切迫した状況」に至るまでの、海上衝突予防法に従った両船の行動の如何が、海難審判の場では明らかにされるべきだからである。

４. VHF による操船決定における合意

前項で検討した一例の衝突事件では、海上衝突予防法に反する合意が、VHF によって行われた。この合意について海難審判は、「本件発生に至る事由」と「原因の考察」にて指摘し、海上衝突予防法に違反する VHF による合意が成立しない旨を暗示的に示している。しかし、当該衝突事件の主たる原因として、海上衝突予防法に違反する VHF 交信が及ぼした影響については言及していない。当該衝突事件においてワ号は、「VHF 交信を十分に行う時間的余裕がないことから、即座にこれに同意」している。時間的余裕がないため同意せざるを得なかったワ号が、その後、避航動作をとることに躊躇したという可能性が考えられる。他にも、有効な情報（VHF による交信）があったがゆえに、航法規程に反する操船を行い、衝突を招いたという事例[7]もある

操船者に適切で有効な VHF 利用を促すためにも、また海難の未然防止に寄与するためにも、日本として VHF 交信の使用指針を示す必要があるものと考える。特に、戒めなければならないのは、COLREGs（海上衝突予防法）に違反する合意を、2 船間で行ってはならないということである。そこで、規則からの離反について定めている「切迫した危険のある特殊な状況」における VHF 使用の問題について、最後に検討することとする。

５．COLREGs に違反した合意

海上衝突予防法第 38 条（COLREGs RULE2）は、切迫した危険のある特殊な状況において、船舶は、規則から離反することができると定めたものである。この離反とは、特殊な状況のある場合又は切迫した危険がある場合にのみ許されるものであり、COLREGs に反する行動をとることが有利であると考えられる場合はいつでも、そうした行動をとる権利を船舶に与えるものではないと解釈されている[8]。また、このような状況は、非常に稀である[9]とされている。

では、「切迫した危険のある特殊な状況」におけるVHF交信とは、どのようなものが考えられるのだろうか。通常VHF交信は、時機、手段を問わず、「衝突を避ける」ために行われることが多いので、総じて「RULE2は適用しない」と断定するのは困難である。強いて言うならば、衝突のおそれを効率良く回避する手段として用いられた VHF 交信を正当化させるために、RULE2を持ち出してはならないと言うことができるであろう。しかし、3で述べたように、真に「切迫した状況」において、例えば「右舷対右舷」の交渉が行われるようなVHF交信は有効なものである。

ここで問題となるのは、有効な交信（規則からの必要な離反行動に関する交信）と有効でない交信（規則からの不必要な離反行動に関する交信）の区別を明確に示すことが、可能であるかという点についてである。海難審判制度は、衝突という結果から遡って、両船の行動の是非を結果論的手法により結論づけるという性質をもつ。それゆえ、VHFを使用して衝突に至ったならばその使用が無効であったとし、VHFを使用せずに衝突に至ったならば、使用すべきであったと述べるに留まっている。「船員の常務」として、「切迫した状況」を回避する手段として、有効なVHF交信を促すのであれば、衝突に至ったケースについても、VHF交信が有効であったかどうか、もしくはVHF交信における改善点について、明確に示していく必要があると考える。

６．おわりに

本稿では、VHFという、船員にとっては非常になじみのある航海計器に着目し、航法と航海計器の関係について、すでに分かりきっていると思われる常識的な事柄を取り扱った。航海計器の発達は、近年非常にめざましいものがある。しかし、航海計器は、あくまで操船決定における情報を提供するのみであり、航海計器がいかに有効な情報を提供しようとも、航法規定（COLREGs）から逸脱した操船決定を行ってはならないことは明らかである(10)。このように言葉で示すことは容易であるが、実際に、航海計器がもたらす時間的な拘束や大量の情報が船員の心理に及ぼす影響については、今後検討する必要がある。

近い将来、AISとの相互作用により、VHFは非常に有効な航海計器として見直されることになるであろう。VHFの使用がどのようになされるべきか、航法との関係を含め、指針を示すべきものと考える。

参考文献

(1) 逸見真：航海者としての自律性の養成―航海術の発達がもたらす規範意識喪失への対応―，日本航海学会論文集, Vol. 128, pp. 111-114, 2013. 3.
(2) S.J,Harding : The‘ALVA CAPE’and the Automatic Identification System，The Use of VHF in Collision Avoidance at Sea , THE JOURNAL OF NAVIGATION，Vol. 55，pp. 440-441，2002.
(3) 藪内稔：一隻入魂，pp. 103-104，成山堂書店，1992.
(4) 総務省：海上における船舶のための共通通信システムの在り方及び普及促進に関する検討会報告書平成21年1月，http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/2009/090127_2.html
(5) 財団法人海難審判協会編：海難審判庁裁決例集，第 27 巻，pp. 96-102，財団法人海難審判協会，1987.
(6) A.N.COCKCROFT・J.N.F.LAMEIJER／藤崎道好訳：1972 年国際海上衝突予防規則の解説，p. 39，1977.
(7) 財団法人海難審判協会編：海難審判庁 海難審判所裁決例集，第 52 巻，pp. 59-71，財団法人海難審判協会，2012.
(8) A.N.COCKCROFT・J.N.F.LAMEIJER／藤崎道好訳：1972 年国際海上衝突予防規則の解説，p. 9，1977.
(9) I.P.A.Stitt：The Use of VHF in Collision Avoidance at Sea， The Use of VHF in Collision Avoidance at Sea, THE JOURNAL OF NAVIGATION, Vol. 56, pp. 70-71，2003.
(10) 松本宏之：海上衝突事件研究（海難審判）[第一回]，海上保安大学校研究報告 法文学系，第 37 巻第 2 号，P. 80，1991.

Automatic Collision Avoidance System Coping with Various Emergency Levels

Student Membership ○ Yuanbing Cai（Osaka University）
Membership Kazuhiko Hasegawa（Osaka University）

Abstract

In the congested waterway like Singapore Strait and Shanghai area, due to the high density of traffic flow, emergent encounter of multiple ships will occur frequently, which may result in near misses and even collisions. Marine Traffic Simulation System (MTSS) is a tool to reproduce the marine traffic flow in these areas. The main part of it is an automatic collision avoidance subsystem based on the conception of fuzzy reasoning regarding to collision risk. In this paper, first, simulation of Imazu problem, which is a series of ship encounter situations, has been conducted to check our system's reliability. Then, for the more severe situation, in which some ships' behaviors don't follow the international regulation of collision avoidance at sea (COLREG), in order to make sure no collision happens in the water area, three levels of emergency degree has been put forward to distinguish how dangerous the ship is and instruct the ship to take appropriate avoiding actions. From the simulation results, our system could detect the target ship's irrational behavior and make appropriate reaction against it.

Key word: Collision Avoidance, Imazu Problem, Emergency level,

1. Introduction

Marine Traffic Simulation System (MTSS) is a powerful tool to reproduce realistic marine traffic flow. It is equipped with a collision avoidance subsystem based on Fuzzy reasoning[(1)(3)]. The system, therefore, can instruct every ship to search for the most dangerous ship in the area to take appropriate action against it while focusing on the other threat and take action again if necessary[(2)]. The avoiding action includes the right turning and speed reduction. Now the system has been proposed for various applications such as safety assessment of port, intelligent ship simulator and waterway design.

Imazu problem[(7)] is a series of ship encounter situations which are considered to be difficult for collision avoidance. In the congested waterway like Tokyo bay and Shanghai area [(4)(5)], dangerous encounter of multiple ships similar to Imazu problem may occur frequently. If some ships' behaviors don't follow the international regulation of collision avoidance at sea (COLREG), the situation could be more severe. In this paper, simulation of these special emergency cases based on Imazu problem has been conducted.

2. Imazu Problem and Its Simulation

Imazu problem was summarized by Imazu from Tokyo University of Marine Science and Technology based on the real ship sailing data. It includes relatively easier two ships' encounter and the more complicated multiple ships' encounter situation. the Figure 1 shows the 22 cases of Imazu problem.

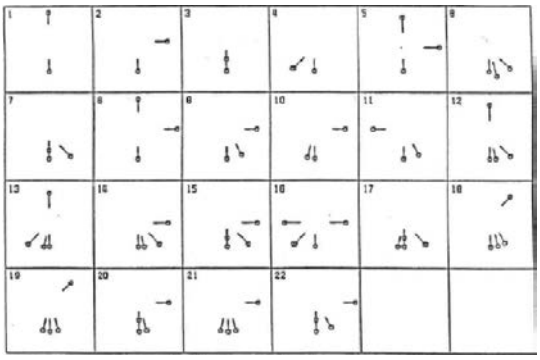


Figure 1 Imazu problem

The circle shows the position of every ship while short bar gives the speed direction for easy looking. The speeds of all the ships are similar in the figure. Equipped with our automatic collision avoidance system, all the ships' movements have been simulated.

In our avoiding rule[(2)], for the two approaching ships, we defined 7 kinds of encounter types based on the

encounter angle and relative angle. According to different encounter types, one ship will take different avoiding action towards the other at different time based on the value of collision risk (CR).

Simulation of all the 22 cases have been conducted, here we choose case 14 for explanation. Figure 2 and 3 give the simulation result.

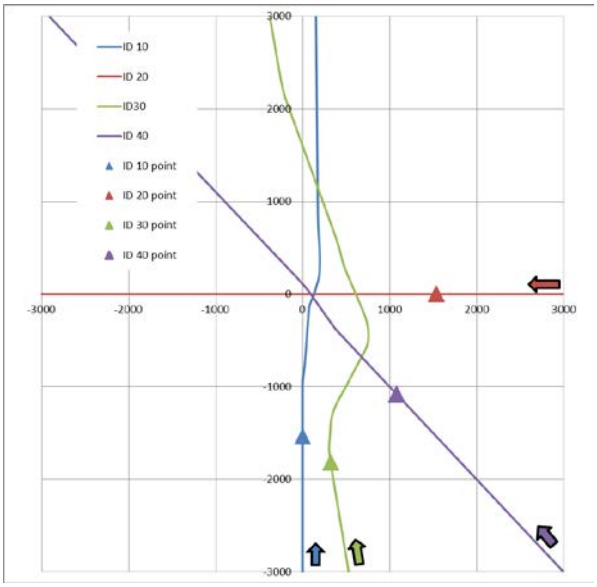


Figure 2 Ship Trajectory for case 14

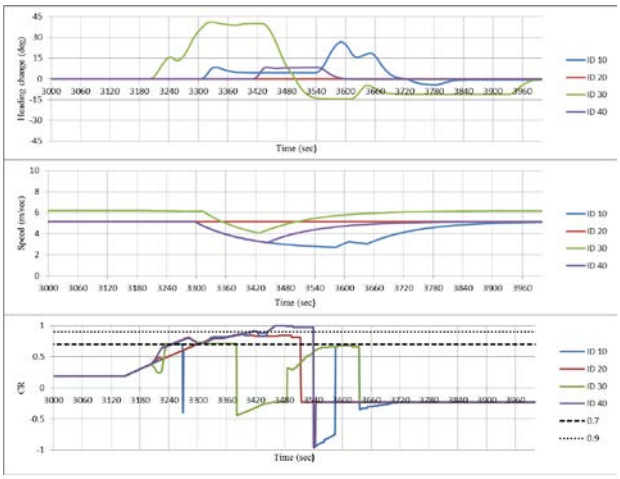


Fig. 3 Ship heading change, speed and CR for case 14

In figure 2, four triangles give the positions while the arrows reveal the direction of every ship. The four color lines show the trajectories in time series. Figure 3 gives the ship heading change, speed and collision risk for all the four ships.

In our rule, according to the encounter type, the ship will be defined in 2 ways towards the target ship. One is give-way ship, and the other is stand-on ship. The give-way ship will take right turning or reduce speed immediately when CR become higher than 0.7. However, for the stand-on ship, it will wait until CR become higher than 0.9. Due to the fact that most of the seamen aren't willing to reduce ship speed when they pass by other ships, the stand-on ship in our system has been divided 2 groups again with different avoiding behavior after CR exceed 0.9. One will act just like the give-way ship. However, the other will not reduce speed even if the situation is dangerous.

It is noted that the give-way ship and stand-on ship are relative conceptions. A ship may be give-way ship towards one ship, but be the stand-on ship to another ship.

From the results of case 14, due to different encounter type, some ships take avoiding action when CR exceeds 0.7 and some ships react after CR become higher than 0.9. After a series of avoiding actions, we can see that no collision happened in the area. For the other 21 case, our system also instructs every ship to avoid collision successfully. Hence, we can conclude that our system has solved the Imazu problem.

3. Emergency levels and Simulation Result

From the simulation result, we can understand that when all the ships follow our avoiding rules, no collision happens in the simulation area. However, it is impossible equip all the ships in the world with our system and even for the equipped ships, sometimes the system could break down. Besides, in the real world, many other different reasons will also result in the ship's abnormal behavior to make the situation become much more dangerous. Therefore, it is necessary to make sure our system could deal with those emergency ship encounters.

When sailing on the sea, the own ship will always search for the potential threat and take action against it when necessary. If the target ship's behavior are abnormal, the own ship should detect it and take avoiding action earlier, especially for the stand-on ship, because, if the give-way ship doesn't avoid, there will be a high possibility of collision. In our system, an additional detecting function has been added to every ship. The stand-on ship will start to check the target ship's movement usually when CR become higher than 0.7. The checking time is set as 10 seconds temporarily in the system. In some extreme case, if the checking

procedure starts after CR become higher than 0.9, the checking time will be shorten to 5 seconds. It is noted that this checking time is only set for our system, and the time span should be discussed and set more carefully depend on different situations. For the give-way ship, there is no need to check the target ship's behavior since it will take avoiding action when CR exceeds 0.7 anyway.

According to the degree of the risk, three emergency levels have been defined in this paper. The higher the number is, the more dangerous the encounter is. The situations for give-way ship and stand-on ship are discussed separately. The emergency levels and avoiding actions for give-ship and are showed in table 1.

Table 1 Emergency Levels for Give-way Ship

Emergency Level 0 (CR<0.7)	No Avoiding Action
Emergency Level 1 (CR>0.7)	Right Turning or Reducing Speed (According to ACR)

For the give-way ship, when CR becomes higher than 0.7, the own ship will start to take avoiding action, thus there will be only two levels. The action will be decided by ACR[(2)], if ACR is higher than 0.7, it means that it is dangerous to turn right, therefore the ship will start to reduce speed. However, the situation for stand-on ship is more complicated. Table 2 gives the emergency levels for stand-on ship.

Table 2 Emergency Levels for Give-way Ship

If target ship's behavior is normal		
	Hold-on	Hold-on without speed reduction
Emergency Level 0 (0.9>CR>0)	No Avoiding Action	No Avoiding Action
Emergency Level 1 (CR>0.9)	Right Turning or Reducing speed	No Avoiding Action
If target ship's behavior is abnormal		
Emergency Mode 2 (0.9>CR>0.7)	Right Turning (30 deg.)	Right Turning (30 deg.) Reduce Speed (1/2)
Emergency Mode 3 (CR>0.9)	Right Turning (45 deg.) Reduce Speed (1/3)	Right Turning (45 deg.) Reduce Speed (1/3)

As you can see in this table, according to the encounter type, there are two types of stand-on ship. One will not reduce speed and the other will if necessary. There are four emergency levels. If the target ship's behavior doesn't follow the COLREG, the own ship will take avoiding action earlier than usual, when CR exceeds 0.7. Usually the encounter type of Hold-on without speed reduction will be more severe because the target ship comes from the left behind side. If the own ship turn right to avoid, two ships heading will be almost the same, then they will keep moving in parallel for a long time to deviate too far from the original path. Thus, the own ship will start reduce speed as soon as CR exceeds 0.7.

Simulation of two ships encounter has been conducted. In the simulation, the target ship approaches our own ship from different directions. The following Figure 4 and Figure 5 give a simple example in which the own ship is stand-on ship. It is the case 4 of Imazu Problem.

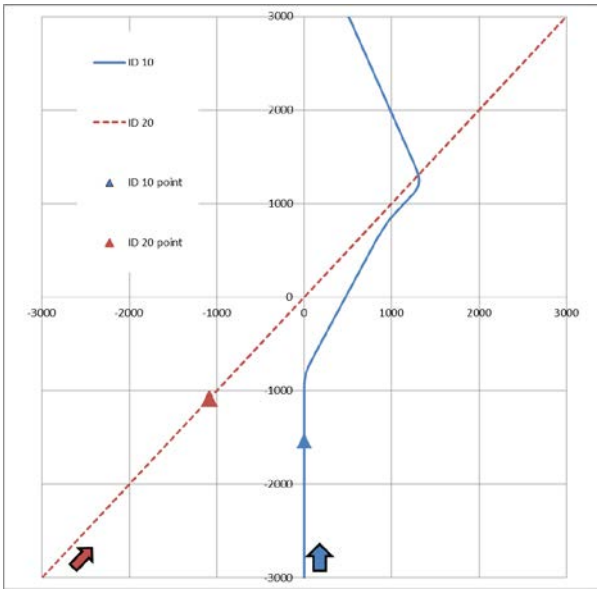


Figure 4 Ship Trajectory for case 4

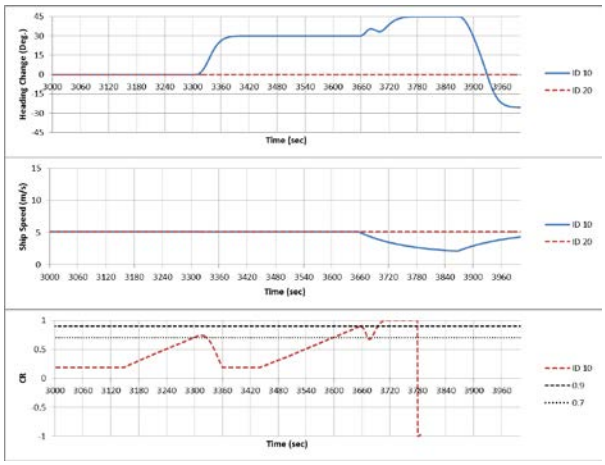


Fig. 5 Ship heading change, speed and CR for case 4

In the above example, the ship ID 10 is set as the own ship and ID 20 is the target ship. According to the encounter angel and relative angel, the ship ID 20 is the give-way ship and it should avoid ship ID 10 actively.

However, in this case, due to some unknown reasons, the ship ID 20 keeps its heading and speed all along. Ship ID 10 starts to check the target ship's behavior after CR exceeds 0.7 and then finds out that the give-way ship doesn't take any avoiding action. So it starts to avoid by itself. First, the own ship turns right for 30 degree, but the collision risk decreases for a while but increases again and reaches 0.9. It means that turn 30 degree is not enough. Then the own ship starts to reduce speed and increase the turning angle to 45 degree at the same time. The result shows that the own ship avoids the target ship successfully and returns to its original path. The minimum distance between two ships is near 100 meters.

For multiple ships encounter, the situation is much more complicated. The following figure 6 gives the four ships' trajectories for case 14.

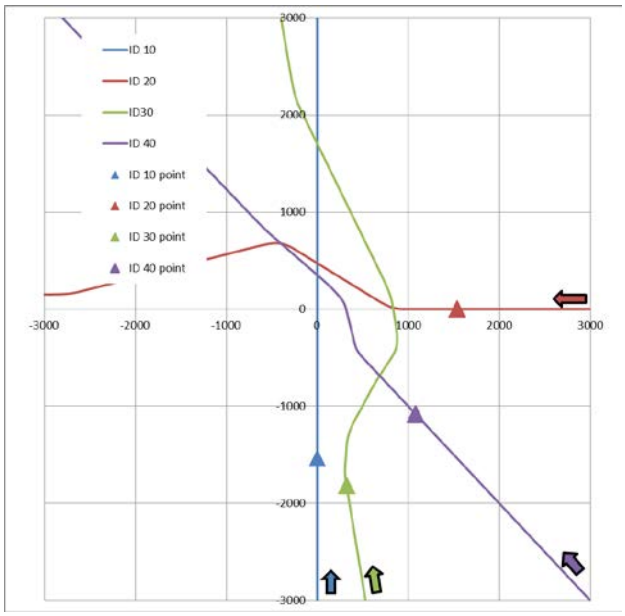


Figure 6 Ship Trajectory for case 14

In this case, ship ID 10 is set to keep heading and speed and the other three ships avoid each other. From the result, we can understand that ship ID 20 had an obvious avoiding action compare to the simulation in chapter 2. Even though no collision happens in the area at last, the behavior of ship ID 10 does make the encounter much more dangerous.

4. Conclusion

In this paper, several simulation of Imazu Problem has been done. Main conclusion can be drawn as follows:

1. When an automatic navigation system is evaluated, it is necessary to be done with various simulations including emergency cases.

2. Different emergency levels have been defined for give-way and stand-on ship, based on the behavior of the target ship and the collision risk (CR).

3. The MTSS succeeds to instruct every ship to avoid the collision with the ship whose behavior doesn't follow the COLREG.

4. There are still discussions regarding to the time span for judging target's behavior in the automatic system.

5. Reference

(1) K. Hasegawa.: Automatic Collision Avoidance System for Ship Using Fuzzy Control. Proc. Eighth Ship Control Systems Symposium (SCSS) (2), 34-58, June, 1987

(2) K. Hasegawa, J. Fukuto, R. Miyake, M. Yamazaki: An Intelligent Ship Handling Simulator with Automatic Collision Avoidance Function of Target Ships, Proc. International Navigation Simulator Lecturers Conference, (INSL17), pp.F23-1-10, Rostock, Germany, Sep. 3-7, 2012.

(3) K. Hasegawa. et al.: Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES) (in Japanese). J. Soc. Naval Architecture, Japan (SNAJ) (166), 445-452, Dec., 1989.

(4) R. Miyake, J. Fukuto and K. Hasegawa: publication of Automatic Collision Avoidance Function on a Ship Handling Simulator to the Congested Sea Areas (In Japanese). Proc.20th JSME Transportation and Logistics Symposium (TransLog 2011), Dec., 2011.

(5) K. Hasegawa, E. Fu: Marine Traffic Simulator and its Application of Safety Assessment in Huangpu River of Shanghai. The 15th Academic Exchange Seminar between Shanghai Jiao Tong University and Osaka University, Oct. 2010.

(6) H. Imazu: Research on Collision Avoidance Manoeuvre (in Japanese). PhD Thesis, University of Tokyo, Japan, 1987.

操船シミュレータにおける操縦性悪化船の作成

学生会員　○城戸　裕晶 (大島商船高等専門学校)　正会員　岩崎　寛希 (大島商船高等専門学校)

要旨

「操船」に関する教科書には「操縦性の悪い船」「スパイラル試験での不安定ループ幅」などの項目が出てくる。学校の保有すべき教材として「操縦性の悪い船」の操船体験ができる環境が必要ではないかと考える。本研究では、本校に導入されているビジュアル型操船シミュレータに内含されている供試船の内、VLCC を対象にして、更なる操縦性を悪化した船体運動モデルを作成することを目的とする。そして、操船シミュレータ内の船体運動モデルを今回の悪化船の運動をするように制御することで、操船者が悪化した操縦性の船を体験できるようなシステムをつくる。

キーワード：操船、操船シミュレータ、操縦性能

1. はじめに

本校に平成 22 年より導入されたビジュアル型操船シミュレータには、供試船として VLCC から内航貨物船など計 11 種類の船種が用意されており、今日までに商船学科学生の操船訓練用として使用されてきた。

供試船の操縦性能は船種によって様々であるが、現状ではその船種に対してそれぞれ 1 隻の操縦性能のみしか操船体験ができない。すなわち、同じ船種で、操縦性能が良い船と操縦性能が悪い船の両方を体験することや、また徐々に操縦性能が悪くなった船を体験することなどはできない。

「操船」に関する教科書には「操縦性の悪い船」「スパイラル試験での不安定ループ幅」などの項目が出てくる。また「IMO の操縦性基準の内容」についても記載されている。これらからしても、学校の保有すべき教材として「操縦性の悪い船」の操船体験ができる環境が必要であると考える。

本研究では供試船の中で元々操縦性能の悪いとされている VLCC を例にとって、その VLCC を手本にして更なる操縦性を悪化した船体運動モデルを作成することを目的とする。

図 1 ビジュアル型操船シミュレータのイメージ

2. 研究の手順

研究方法として、次の手順で行った。

① 操船シミュレータの構成と、それに内含されている VLCC モデルについて調査した。

② 本研究の目的の一つである、操縦性悪化船を作りだすための、パソコンでファーストタイムシミュレーションが行える船体運動モデル(以下、パソコン版ファーストシミュレーションと記す)を作成した。

③ このシミュレータ内含 VLCC モデルをもとに、ほぼ似た動きをするパソコン版ファーストシミュレーションモデルを同定する方法についても吟味した。

同定された VLCC モデルの操縦性を、3 段階に悪化させる方法について、以下に記述する。

本研究には、シミュレータに内含されている VLCC モデルと、同じ動きをするファーストシミュレーション用のパソコン運動モデルが必要となる。その理由としては、

① シミュレータではスパイラル試験や逆スパイラル試験等を行うにあたり、実船と同様に時間がかかり、作業の進捗に影響をきたす。

② また、操船シミュレータのパネルには、アナログ角速度計しかなく、精度を保った上での、逆スパイラル試験等が行えない。

③ 操縦性悪化船モデルの同定のためにも、繰り返しシミュレーションする必要がある。

などの理由からである。以下、パソコン版ファーストシミュレーション用の運動モデルを作成する手順を記す。

① 供試船 VLCC の操船シミュレータによる旋回試

験、Z 試験の実施

② 供試船と Cb の近い同型船の流体力微係数データを用意

③ 同型船の流力微係数のチューニングと供試船への同定

④ ファーストシミュレーションを用いたスパイラル試験、逆スパイラル試験の実施し、操縦性悪化の具合の調査

3. 研究成果

２．で述べた方法により、シミュレータに内含されている VLCC モデルのパソコンへの移植ができ、パソコン上にて同じ動きをするファーストシミュレーションが可能となった。可能となったことで、ファーストシミュレーションを用いてスパイラル試験、逆スパイラル試験がパソコン上にて短時間で実施できるようになった。

ここで船体・機関・プロペラはそのままで操縦性を悪化した船体運動モデルを作る。その方法は、舵高さを変えずに、舵面積を縮小することとした。そして、ファーストシミュレーションを用いてスパイラル試験の δ−r 曲線の傾き(舵に対する旋回力の大きさを表す)を悪くする(すなわち小さくする)ようにして、操縦性を悪化した船体運動モデルを作成した。

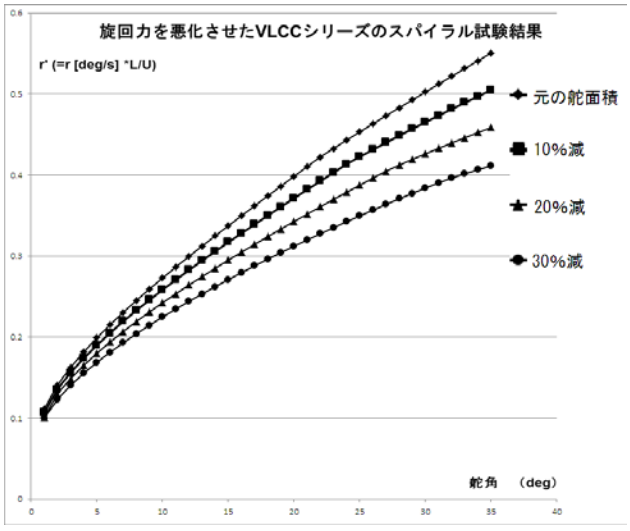


図 2 徐々に旋回力を悪化させた VLCC モデルのスパイラル試験結果

4. 操縦性を悪化したモデルの操縦体験システムの構築

操縦性を悪化したモデルの操縦体験システムの構築を行うにあたり、その構成を図 3 を使って説明する。このシステムは、特設舵輪(手前)、悪化船モデルマシン(左側)、悪化船追従マシン(右側) から構成されている。まず、特設舵輪はゲーム用のハンドルタイプのジョイスティックとそのジョイスティックの動きを検知するパソコンを組み合わせ作成した。特設舵輪の舵角が生じると、悪化船の動きが計算される。その動きを擬似化追従マシンへ LAN 通信で伝える。同追従マシンでは、悪化船の動きになるようその針路を制御する。

なお、今回は、悪化船モデルには同定した悪化船運動モデルを組み込み、悪化船追従モデルには舵に対する応答の速いコンテナ船モデルを組み込んだ。そうしたのは、もともとの VLCC を同追従モデルに入れると、制御舵に対する応答が遅く、うまくいかなかったからである。

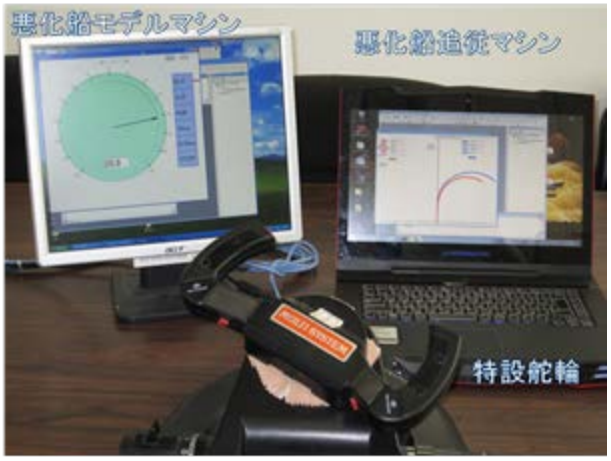


図 3 システム構成図

次に、図４　に擬似化追従性マシンの入出力関係のブロック図を用いて、システムを説明する。特設舵輪の舵角に応じた悪化船の運動諸元を演算し、針路Po、角速度ro、速力ｕoを得る。また、悪化船追従マシン内の船の現針路Pn、現角速度rn、現速力ｕｎが計算されている。悪化船の動きに、追従船の動きを合わせるため、PD制御的に舵角 δ *を演算する。悪化船モデルマシン内では、両船の針路差(Pn-Po)と、追従船の旋回角速度rnに応じて、この δ *は決定される。

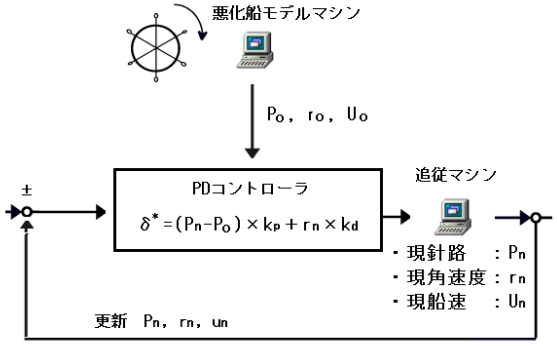


図 4 擬似化制御モデル

操縦性擬似化システムの実証実験を行った。実験の結果を図 5 ～図 7 に示す。

図 5 は、悪化船の動きに悪化船追従マシンの船の動きを合わせた旋回試験の航跡結果である。図でわかる通り、航跡は完全には、一致しなかった。また図 6 に示す通り、Z 試験の航跡結果も完全には一致しなかった。

図 5 を見ると、悪化船が先行しているが、追従船の方は、追いついていない。悪化船は舵面積が小さいため、旋回性は悪くなっているが、操舵しても船速が落ちない。一方、追従船は悪化船の針路変化に追従しようと、頻繁に舵を取ることで、6～7 割に船速が落ちてしまう。これらのことから、追従船は、悪化船が通っていった航跡をたどりはするが、時間的には遅れてしまうものと考える。図 6 の＋10° Z 試験の航跡についても、第一カーブから第二カーブまでは航跡はあっているが、少しずつ悪化船の方が先行し、追従船は後を追っている形である。しかし、第三カーブあたりから、船速の違いが起因して、旋回性にも差が出てきている。

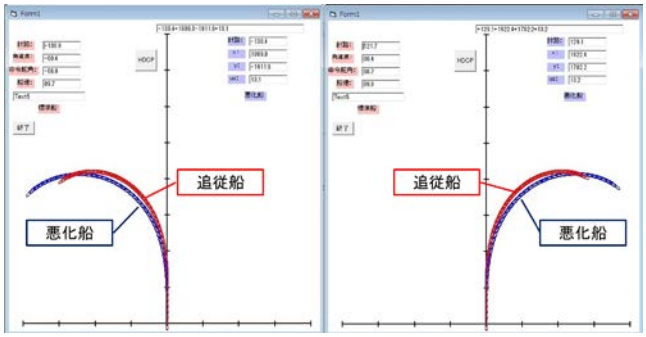


図 5 パソコン上における実証実験の旋回試験航跡

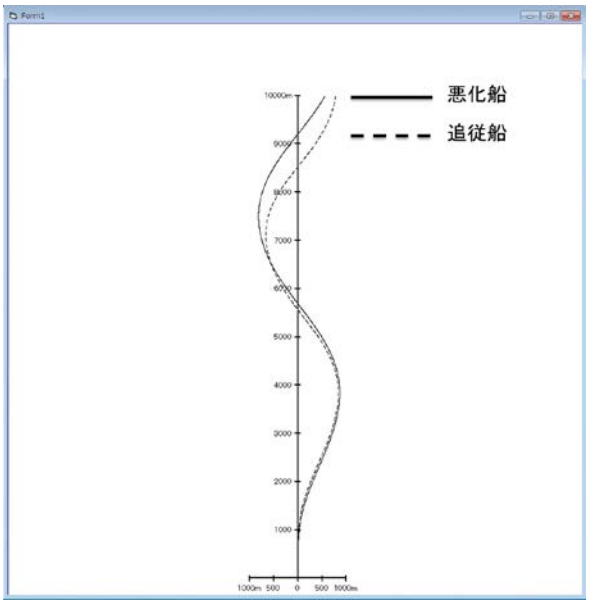


図 6 パソコン上における実証実験の Z 試験航跡

次に、この図 6 の＋10° Z 試験の結果を P−δ（針路−舵角）タイムヒストリーで見てみる。図 7. を参照して欲しい。実線が悪化船のもので、破線が追従船の動きである。操船者は悪化船に＋10° Z 試験を実施するべく、±10° 舵を針路に応じて、きりかえしている。それに対し、追従船の方は、悪化船の舵に対する針路の変化に追従すべく、±3～5° で対応している。針路変化を見ると、悪化船の舵に対する針路の応答を、追従船は忠実にたどっていることがわかる。

舵角に対する針路の応答が、合ってくると、そのことを知らない操船者は、本システムが間接的に操縦している追従船を「悪化船」と思い込んで、「悪化船をちゃんと乗りこなした」と認識したと思うであろう。しかし、前出したように船速の追従が不全であるので、航跡については追従船が後追いしてしまうのである。

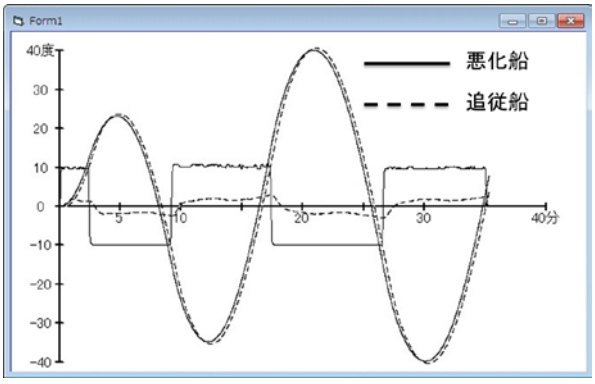


図 7 パソコン上における実証実験の Z 試験結果
(P−δ 曲線)

5. まとめ

① 本レポートでは、供試船の中で操縦性能が元々悪いとされる VLCC を対象船として、VLCC の更なる操縦性を悪化した船体運動モデルを作成した。そして、操船シミュレータ内の VLCC モデルを今回の悪化船の運動をするように制御することで、操船者が悪化船の操縦性能を体得できるようなシステムをつくるために、まずはパソコン2台による操縦体験システムを試験的につくった。

② 本校に導入されているビジュアル型操船シミュレータ内の操縦性能の悪いとされる VLCC の旋回試験及び Z 試験を実施した。その結果、IMO の操縦性基準は満たしていることが分かった。

③ 次に、この VLCC モデルを加工して、VLCC 操縦性悪化モデルを作成した。そのために、この VLCC と同じ動きをするファーストシミュレーション用のパソコン運動モデルを同定して動かせるようにした。

④ ファーストシミュレーションにて、スパイラル試験、逆スパイラル試験を行い、操船シミュレーション用の VLCC モデル、並びに悪化船モデルの操縦性を確認した。

⑤ VLCC モデルの操縦性を悪化した船体運動モデルの作成方法は、舵面積を縮小することでスパイラル試験の δ-r 曲線の傾きを悪くするようにして操縦性を悪化した船体運動モデルを作成した。作成するにあたり、旋回力指数 K’ を 20%、30%と減少させた場合、それぞれ舵面積が 48%、58%と減少すれば、操縦性能を悪化することが判明した。

⑥ 悪化船モデルをパソコンに組み込み、ゲーム用のハンドルタイプのジョイスティックを特製舵輪として繋いで、リアルタイムシミュレーションで動く悪化船マシンを構築した。なお、この悪化船マシン画面には舵角、テレグラフ・オーダしか表示されていない。

⑦ 一方、他マシンには、操縦性の良いコンテナ船モデルを組み込み、悪化船システムから LAN 経由で情報が入出力されるような悪化船の旋回運動を忠実になぞる追従性マシンを構築した。なお、この追従性マシンには、鳥瞰的に悪化船に疑似化したコンテナ船の動きを描いた。

⑧ マシン2台を連動して動かすことで、操船者は悪化船追従モデルの動きを悪化船と思い込み、悪化船を操縦体験する。その実証実験として旋回試験、+10° Z 試験を行った。その結果、本来の悪化船の航跡と、その動きになぞる追従船モデルの航跡を比較した。

⑨ 同じく＋10° Z 試験の結果を P-δ（針路-舵角）曲線のタイムヒストリーで見ると、悪化船の舵に対する針路の応答を、追従船は忠実になぞった。しかし、船速の追従が不全であることが起因して、航跡については追従船が後追いしてしまった。

⑩ 今回は、追従船のモデルを舵の応答の良いコンテナ船モデルをパソコンに入れ、悪化船の動きになるように制御した。今後の課題としては、パソコンシステムにて悪化船の動きを追従船になぞらせることが可能であることが確認できたので、次は悪化船の動きを本校にあるビジュアル型操船シミュレータ内の供試船を制御して悪化船の動きを体験できるかを確認したい。

参考文献

(1) 岩崎寛希：初心者のための操船シミュレータを用いた大型船操船訓練に関する研究 , 神戸商船大学学位論文, 2003.
(2) 日本造船学会:第3回操縦性シンポジウム,1981.
(3) Kijima, k., Katsuno, T., Nakiri, Y., and Fukukawa, y.：On the Maneuvering Performance of a Ship with the parameter of loading condition, 日本造船学会論文集, 第 168 号, 1990.
(4) 芳村康男：浅水域の操縦運動数学モデルの検討-MMG モデルの浅水域への適用について-, 関西造船協会誌, 第 200 号, 1986.
(5) 日本造船学会：操縦性研究の設計への応用, 運動性能研究委員会,第12回シンポジウム,pp91, 1995.
(6) 小瀬邦治, 佐伯敏郎: 運動操縦の新しい数学モデルについて,日本造船学会論文集,第146号, 1979.

アイカメラを用いた操船者の情報収集特性に関する研究
-衝突回避操船における情報収集特性-

学正会員　○馮　天承※（東京海洋大学大学院）　名誉会員　小林　弘明（東京海洋大学）

要旨

本研究は、衝突回避操船における操船者の情報収集特性の解析を目的としている。人間の視線が把握可能なアイカメラという装置を用いて、操船者の視線解析を行った。この装置が船橋において操船者が行う操船業務を確実に把握可能であるかの調査を行った。その調査結果によって明らかになった問題点を解決し、操船者の視線解析を行う為の最適な計測環境を整えた。視線解析実験では、安全運航が達成可能な現役の航海士に操船を行ってもらった。計測したデータを解析した結果、特徴的な情報収集特性を認める事ができ、またそれらの特性は論理的にも妥当な特性である事が確認できた。

キーワード：操船・推進、操船者特性、視線解析

1. 研究目的

1.1 緒言

現在、私たちの身の周りに存在する航空機や列車などの運航システムに代表されるような大半の大規模システムは、人間が所定の役割を果たすことを前提に、設計・運用されている。システムの目的を果たすためには、人間が必要な機能を達成しなくてはならない。人間はシステム内において、極めて重要な役割を担っている事が明らかである。

数ある大規模システムの中でも、特に船舶運航システムは他と比べて非定常的な環境におかれる場合が多く、その時々において人間が適切に対応する必要がある。船舶運航システムの安全性・安定性は人間に依存するところが大きい。我々は船舶運航システムについてシステム工学の観点から、東京海洋大学の操船シミュレータを用いて操船者の行動をモニタリングし、そのヒューマンファクタについて研究を行ってきた。その成果として、船舶運航に必要な操船技術の体系化・海技者の標準的行動特性の定式化、等々が得られている[(1)]。

1.2 目的

既存の操船シミュレーターモニタリングシステムは、船橋内で行動する海技士の映像と会話音声を記録している。また、航海計器類の操作状況をリアルタイムに記録している。これらの記録映像を分析することによって行動分析を行っている。

次に示している図 1 は操船シミュレータにおいて記録される映像群の一例である。上段は船橋映像。中段は船橋内にあるレーダーの操作状況。下段は双眼鏡映像である。全ての映像は音声と共に同期記録されている。

図 1　操船シミュレータ記録映像群（例）

ここで下段の双眼鏡映像を見ると、双眼鏡は操船者が特定の船舶や対象物に向けて注視するため、記録された双眼鏡映像を確認する事でその注視対象を把握する事が可能である。

次に、レーダー操作状況映像を見ると、操船者が他船を捕捉した場合、その結果はレーダー画面上に他船ナンバー表示・ベクトル表示、及び ARPA のデー

タ表示として反映されるため、どの船舶を捕捉したか、把握することが可能である。

しかし、機器操作を伴わないレーダー監視は、記録映像からでは操船者が何を見ていたのかを把握する事はできない。

以上の事から、操船者が何を見ているのかが外部から把握できるようになれば、操船者が衝突回避操船においてどのように情報を利用しているのかを理解する事ができる。また、その結果によって効果的な情報提示を行う航海機器の開発等に寄与できる事が考えられる。

2. アイカメラによる視線解析

そこで、人間が見ている情報を正確に知る方法として、視線追尾装置というものを利用し、操船者の情報収集特性を解析する事を考えた。以下、視線追尾装置をアイカメラと呼称する。

既製のアイカメラが、本実験の目的を達成可能な要求性能を満足するものであるという保証はない。要求性能とはすなわち、操船者が船橋内において行う業務について、連続した行動の中でその注視対象を把握できる性能を有している事を意味する。
本アイカメラについて、要求性能を達成する上で主となる問題点とその解決方法について主要な項目を以下にまとめる。

・分解能による計測限界
・視線計測における瞳孔検出の安定性
・キャリブレーションデータによる計測誤差

ここでは、分解能による計測限界について記述する。

アイカメラの視線計測の分解能を考慮したときに、計測可能な最小限界というものが存在する。最小限界とは、その数値以下の大きさの注視対象、及びその数値以下の距離で隣接する注視対象を特定可能な限界を意味する。本装置の分解能は視角 0.5 度から 1.0 度である。例として、操船者の目とレーダー画面との距離が約 75cm であるとすると、レーダー画面平面上に 1.3ｃｍの大きさとしてあらわれる。これは、大きさが 1.30cm 以下、もしくは 1.30cm 以内に隣接している視標である場合、正確な計測ができなくなることを意味する。

見張り業務においてレーダーを利用した情報収集は操船者にとって重要なものである。既存の ARPA 情報欄の文字サイズはディスプレイ上の距離に換算すると 0.8cm で、項目と項目の間の距離は 0.65cm となっている。このアイカメラの分解能によれば、レーダー画面に対する正確な視線計測をするのは困難であることが分かる。

図 2 改良後のレーダー画面（例）

そこで、シミュレータシステム内のレーダーシステムのプログラムの改良を行い、ARPA 情報の表示枠を３つから２つに減らした。改良後のレーダー画面について、その一例を図２に示す。文字サイズを２倍の1.6cmにし、項目間の距離を３倍の2cmにして、アイカメラの計測限界を考慮した計測環境を作り上げた。

現在、一般的に使用されているレーダーは、ARPA 表示数に関しての規定はなく、様々なユーザーインターフェースの種類がある。例えば、ARPA 情報の表示数が１つだけのレーダーもある。今回の改良は実務環境における一般的な仕様からかけ離れておらず、通常の操船業務が行えると判断する。

本研究ではこれらの問題を把握し、その解決をする事で視線計測実験を行う事ができる最適な実験環境を作り上げる事に成功した。

3. 実験と解析

本実験で使用されたシミュレーターシナリオは計３つある。いずれも伊豆大島の竜王崎灯台を 220 度方向 6 マイルに見ての変針を一回含んでいる。大島南方から北方に航行するインバウンドが 2 回、北方から南方に向かうアウトバウンドが 1 回である。これら３つのシナリオに本船に対して強い干渉をしてくる船舶を設定した。シナリオ全体の設定に関する要件については、その内容を表１に示す。

表１　実験シナリオの設定要件

No.	設定項目	設定内容
1	対象とする見合い関係	海上衝突予防法に規定されている横切り(右舷・左舷)、追い越し、行き合いの計4種
2	実験海域	伊豆大島竜王崎沖
3	航行コース	1つの変針を含む 2コースとする
4	視程	良好＋視程3マイル
5	シナリオに登場する船舶の船種	本船:コンテナ船 避航対象船:コンテナ船及びタンカー船
7	避航対象船以外の船舶の配置	本船に対してなるべく干渉しない見合い関係で配置をする
8	シナリオ1つの所要時間	40分から1時間
9	初期位置における避航対象船との距離	6マイル以上
10	各イベントの所要時間	20分から30分
11	シナリオ1つに含めるイベント数	2から3つ

安全運航が達成可能な能力を持つ現役の二等航海士にアイトレーサーを装着してもらい、操船シミュレータにおいて実際に視線計測実験を行った。本実験では４種類の見合い関係のイベントをそれぞれ２回から３回設定しており、計９ケースの実験データが得られているが、本梗概では右舷からの横切り船に対して得られたデータを中心に結果をまとめていく。

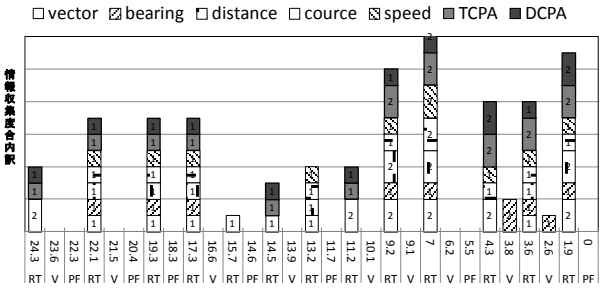


図３　右舷からの横切り船に対する注目度合内訳

図 3 に示した図は右舷からの横切り船に対して、操船者が行った情報収集の内容を、TCPA の時間毎の注目度合の内訳に着目して図示したものである。横軸について下部にデータソースを、上部に干渉船との TCPA(min)を示している。縦軸はその時に収集した情報項目別の注目度合いを表している。情報項目の内容とそれに対応する縦軸は図に示されている通りである。

この TCPA は同列のデータソースからの情報収集が終わった時間を示している。データソースの定義については次の通りである。

V:Viewing
目視による見張り。肉眼による目視・双眼鏡による目視、レピーターコンパスによる方位測定が含まれる。

RT:RADAR TRUE Vector
真ベクトル表示のレーダー画面による見張り。

RR:RADAR RELATIVE Vector
相対ベクトル表示のレーダー画面による見張り。

P:Positioning
船位測定作業。自船位置の確認。

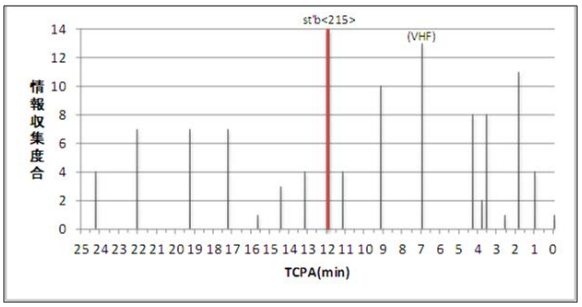


図４　右舷からの横切り船全体傾向

図 4 は横軸に TCPA(min)を時系列として置き、縦軸に情報収集度合の総量を置いたものである。図の太い縦線は航海士が避航を開始したタイミングを示している。この場合、干渉船との TCPA が 12 分の時に右舷側に舵を取って針路 215 度のコースオーダーをしている事を示している。また、TCPA7.0 分の時に干渉船とＶＨＦ通信をしている事を示している。

この図を見ると、避航行動を行う前に比べて避航行動開始以降の方が頻繁に大きな度合で情報収集をしている事が確認できる。そこで、この干渉船について、情報収集を開始してから避航行動をするまでと、避航行動開始直後から TCPA が 0 になるまでに収集された情報の項目別の注目度合の割合を示す。

また注目度合いについて、一般的に人間は対象を見る時に約 250 ミリ秒から 300 ミリ秒の間、視点を固定する特性がある。但し、特別な注視ではその持続時間はこの数倍の長さとなる[(2)]。そこで、正確な数値情報を 0.5 秒以上見た場合該当する情報項目に１と示し、1.0 秒以上且つ複数回見た場合該当する情報項目に２と示す事とした。これは、操船者が長く注視する情報が情報処理において特別な役割を果たす事を仮定して設定した重みづけであり、被験者の注視対象に対する注視度合を表す尺度である。

次にこれらの収集をどのタイミングで行っていたのか、TCPA を時系列として見ていく。

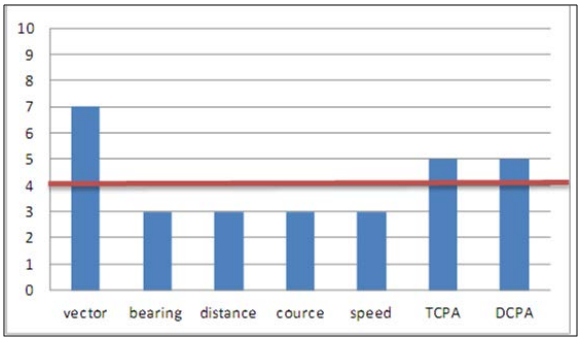


図５　避航前における情報収集項目別割合

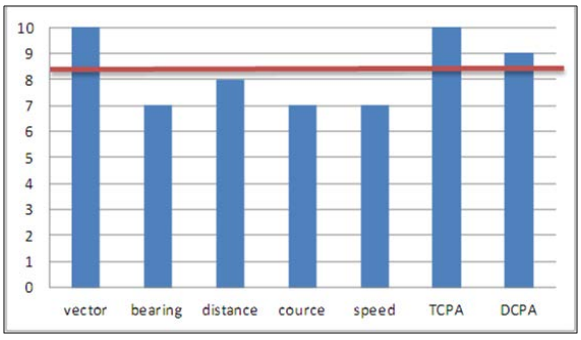


図６　避航後における情報収集項目別割合

図５と図６は本実験において、航海士が収集した情報を項目別に積算をして集計したものである。横軸は情報項目、縦軸は注目度合の積算である。縦軸の注目度合には１のものは１として、２のものは２として算出している。太い横線はそれぞれのグラフの平均線を示している。

この２つの図を見ると、避航前と比べて後の方が２倍以上の差をつけて注目の割合が高い事が確認できる。ここで図 4 を見ると、避航直前までの TCPA と､避航直後からの残り TCPA に２倍以上の差はついていない事が分かる。つまり、避航前に比べて、避航後の方が干渉船に対する関心が強くなったという事が分かる。また、避航後の情報収集傾向として vector（レーダーに表示される他船ベクトル）を筆頭にして TCPA と DCPA に対する関心が高く、その他の情報項目に関しても平均的に高い注目度を示している事がわかる。以上のことから、右舷からの横切り船について、vector・TCPA・DCPA といった現在と将来の両方の状況を含む情報によって、操船者は現在状況の確認と将来予測に努めている事が推測される。

今回の解析において、4 つの見合い関係について複数のイベントを設定したが、その中でも特に典型的な行動であったものについて、操船者が行った大きな情報収集に関する収集のタイミングを以下に示す。大きな情報収集とは、解析対象として扱っている７つの情報項目の内５つ以上を注視している情報収集の事を指す。

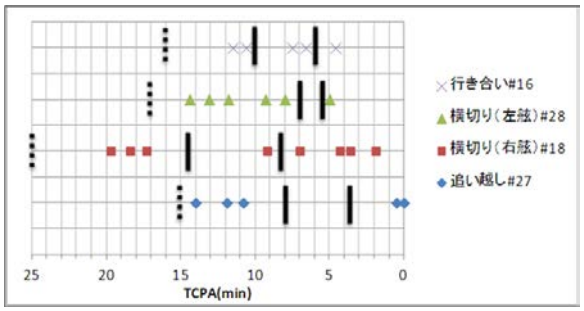


図７典型例の収集タイミング比較

図 7 は横軸に TCPA を置き、大きな情報収集をしたタイミングを図示している。４点の点線は干渉船に対する情報収集を始めた時期を示している。その次の黒の太い棒線は避航開始時期を示し、2 つ目の棒線は避航終了・定針の時期を示している。これを見ても分かるように、右舷からの横切り船に対する情報収集のタイミングが他の見合い関係と比べて早いタイミングで行われており、且つそれが避航後にも集中的に継続されている事が分かる。

4. 実験と解析

本研究において、操船シミュレータにおける操船者の視線計測実験を行う為の計測環境の開発を行い、アイカメラが持つ諸々の問題を解決した上で最適な計測実験環境を整えた。

計測実験を行い、4 つの見合い関係毎に情報収集特性の違いが確認できた。その違いとは、情報項目別の注目度割合の違い、情報収集タイミングの違い等が挙げられる。

また、共通する特性として vector・TCPA・DCPA に対する注目度が高く、いずれの見合い関係でも本船と干渉船の現在位置の確認と将来予測に非常に重要な情報である事が推測される。

5. 参考文献

(1) Hiroaki Kobayashi, Technical Development for Safety Navigation, MaRIENV’95, 1995

(2) Laurence R. Young, & David Sheena, Behavior Research Methods & Instrumentation 1975 Vol.7(5),397-429 Survey of eye movement recording methods, 1995

軽合金製中型船舶の船底汚損が船舶の速力および燃費に与える影響に関する考察

正会員○清水　健一（長崎大学）　正会員　森井　康宏（長崎大学）
正会員　木下　宰（長崎大学）　正会員　高山　久明（長崎大学）

要旨

燃料消費に伴う運航経費の低減を図るため，船底汚損が速力低下，燃料消費量の増大に与える影響，および船底塗料の変更による速力，燃費向上への効果を調べ，省エネ化を視野により効率的な船舶の運航に役立てることを目的に，軽合金製中型船の長崎大学水産学部付属練習船「鶴洋丸」において船底汚損の程度とドック出し後からの経過月による変化を速力試験により調査した。その結果，以下の点が明らかとなった。

（1）速力・燃料消費ともにドック出し 4 ヶ月後の 6 月までは速力の大きな低減化はなく 8 月から速力の減少，燃料消費量の増加が見られた。

（2）船底塗料の変更の観点から船底汚損の状態と各回転数における速力，燃料消費量の変化について比較すると，加水分解型塗料に変更した 2012 年はそれ以前の船底塗料を使用していた 2010 年，2011 年と比較して汚損が大きく減少しており，新船底塗料の効果はあったと考えられる。

キーワード：保守整備，船底塗料，船底汚損，推進性能，　燃料消費量

1. 緒言

船舶のほとんどは燃油を燃料として運航されており，近年の燃油価格の高騰は船主や荷主，漁業者にとって非常に大きな問題である。燃料消費量に大きく関係する要因には主機関の種類，速力および排水量があり，排水量の変化の少ない同一船の場合では，速力の影響が大きいとされている[(1)]。船舶は水抵抗と空気抵抗に抗して推進するが水抵抗が主要な抵抗である。さらに水抵抗は摩擦抵抗，造波抵抗を含む余剰抵抗，渦抵抗に分けられる[(2)]。これらの水抵抗の中で主要なものは摩擦抵抗であり，これは船底の汚損に比例して増大し，速力の低減や燃料消費量の増大につながる。そのため，入渠または簡易船底清掃等により船底を良好な状態に保つことは，船舶の安全確保とともに燃料消費量の低減を図る上で重要な事項である。入渠後の船底の汚損を低減させる方法の 1 つとして船底塗料があげられる。船底塗料には用途別に FRP 船用，鋼船用，軽合金船用等の種類があり，含有物質と効果の持続時間がそれぞれ異なっている。

一方，長崎大学水産学部付属練習船「鶴洋丸」は鋼船ではなく，軽合金製である。軽合金船用の船底塗料にもいくつかのメーカーからさまざまなタイプのものが販売されているが，これらはいずれもその効力の持続時間が鋼船用と比較するとあまり長くなく，たとえば半年に一度ドックに入れて船底清掃を行う船もあるなど，鋼船用の塗料ほど完成されたものではない。

以上のような背景から，長崎大学水産学部付属練習船「鶴洋丸」では，ドックの際に船底塗料のメーカー及び質を変えて，船底の汚損具合と比較しながら，合わせて燃費等への影響を見てきた[(3-4)]。2012 年からはさらに上質の塗料を塗布して，一層の付着量軽減を図っている。

これらのことをふまえ，本研究ではドック出し後からの経過月による変化を速力試験を行って，船底汚損が速力，燃料消費量の増大に与える影響，および船底塗料の変更による速力，燃費向上への効果を調べ，省エネ化を視野により効率的な船舶の運航に役立てることを目的とした。

2. 方法

2.1　供試船および速力試験

供試船には長崎大学水産学部付属練習船「鶴洋丸」を使用した。鶴洋丸の主要目を表 1 に示す。鶴洋丸は 2 機 2 軸の 5 翼固定ピッチプロペラであり，速力の増減は主機回転数の増減により行う。そのため速力試験では主機関回転数を 950rpm(Slow ahead),

1200rpm(Half ahead)，1700rpm(Nav’ Full ahead)，2000rpm(Maximum Full ahead)の 4 種に設定して行った。（以下，それぞれ回転数のみで表記）

表 1　供試船鶴洋丸の主要目

全長	42.79m	垂線間長	34.50m
幅	7.00m		
深さ	3.18m		
総トン数	155トン	（国際総トン数249トン）	
船質	軽合金		
主機関	4サイクル高速ディーゼル機関　2基（出力：1050kw×2）		

速力試験では風や潮流の影響をできるだけ少なくするため，各回転数での船速で往復航行を行った。各試験航走中における船速は鶴洋丸搭載の DGPS の航程積算値を 6 分間隔で読み取り使用した。その間，軸馬力計（湘洋エンジニアリング製 SEC Powermeter）による主機関馬力（SHP），主機関回転数（RPM），燃料油流量（kg/h）を 5 秒間隔で同時に収録した。

速力試験は 2013 年 4 月 22 日，6 月 27 日，8 月 28 日，10 月 10 日，11 月 12 日に行い，比較のため 2009 年から 2012 年において同様に行った速力試験の結果も併せて利用した[3]。

2.2　データの解析

鶴洋丸は毎年度 1 月から 2 月にかけて検査のため入渠し，船底清掃を行う。そこで速力試験で得られたデータを用いて，ドック出し後からの速力，燃料消費量の月別変化・経年変化を調べるとともに，各年度における 4 月を基準とした場合の速力の減速率・燃料消費量の増加率，速力と燃料消費量との関係について解析した。ここで，速力の減速率とは，各年度においてそれぞれの回転数ごとに 4 月の往復平均船速を基準とした場合の各月の往復平均船速の減速割合をあらわしたものである。

2.3　船底塗料の種類および船底汚損状況調査

各年度で使用した船底塗料は異なるため，聞き取り調査により使用した塗料のメーカーと種類を把握した。さらに塗料の成分や特徴については各メーカーのデータシートにより把握した。

また，各年度において定係港停泊中にダイバー数名による簡易の船底清掃を行っているがその時期および経費については事務資料から調査した。

また，各年度での船底の汚損状況調査には各年度でのドックから提出される入渠直後の写真を使用した。

3. 結果及び考察

3.1　ドック出しからの速力の月ごとの変化

図 1 は 2013 年度の鶴洋丸の各回転数における往復平均船速（knot）の月別変動を示したものである。図よりいずれの回転数においても，4 月，6 月では大きな変化はみられず，8 月から速力の減少がみられ，11 月の速力は 4 月よりも約 0.65～0.8knot 減少していた。

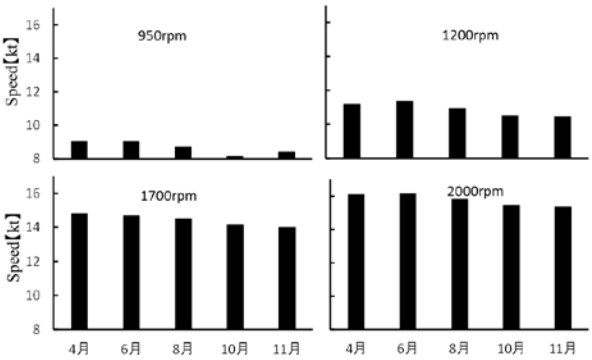


図 1. 2013 年度の各月における回転数ごとの往復平均船速

図 2 は上段に 1200rpm，下段に 1700rpm の場合における 2009 年，2012 年と 2013 年の各月の往復平均速力を左側に，また右側には各年度において 4 月の往復平均船速を基準とした場合の各月の速力の減速率(%)の変化を並べたものである。図より速力の減速率について比較すると，いずれの回転数においても 2012 年が最も小さくなっていた。また，2013 年は 2009 年と比較すると 1200rpm で速力の減速率は大きくなっているものの，常用航海速力である 1700rpm では 2009 年よりやや速力の減速率は小さくなっていた。さらに，いずれの年においても 4 月，6 月では速力の減速率に大きな変化はみられず，8 月から速力の減少，減速率の上昇がみられており，このあたりから船底汚損が進行し始めていると考えられる。

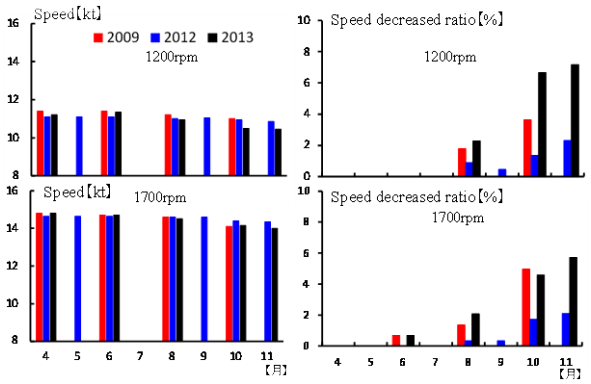


図 2. 年度別の各月における各回転数の往復平均船速と 4 月基準の年度別各月における回転数の速力減速率(上段は 1200rpm, 下段は 1700rpm)

3.2 ドック出しからの燃料消費量の月ごとの変化

図3に2013年度における各月の回転数ごとの燃料消費量(kg/h)を，図 4 に 4 月を基準とした 2013 年における各回転数の月別燃料消費量の増加率を示した。

図 3 より燃料消費量はいずれの回転数においても 10 月と 11 月でほぼ同じであることがわかる。一方図 4 より，どの回転数においても 8 月頃から燃料消費量の増加率が上昇しているが，月ごとで比較すると回転数の違いによる増加率の違いには大きな差は認められない。

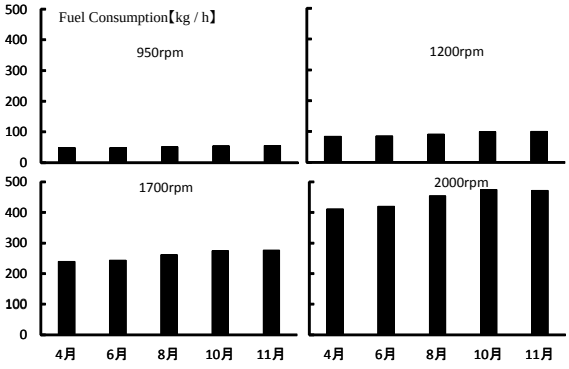


図 3. 2013 年度の各月における各回転数の燃料消費量 (kg/h)

3.3 ドック出しからの燃料消費量の月ごとの変化

図 5 は主機関回転数 1200rpm, 1700rpm における 2009 年，2012 年と 2013 年の各年度でそれぞれ 4 月を基準とした月ごとの燃料消費量の増加率を示したものである。2012 年度ではその年よりも燃料消費量の増加率は小さくなっているが，いずれの年も 8 月以降に燃料消費量の増加率が上昇している。また，2013 年の増加率は 2009 年よりは小さくなっていた。

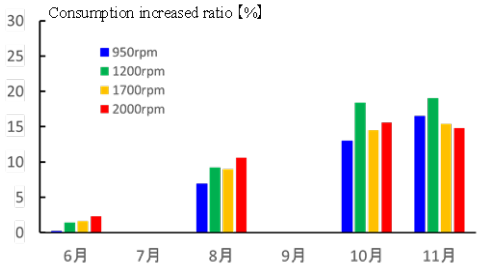


図 4 . 2013 年度における各回転数の月別燃料消費量の増加率 (%) (各回転数は 4 月を基準)

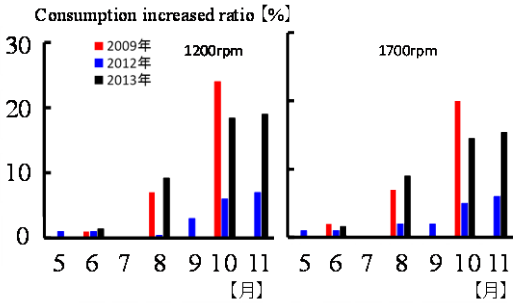


図 5. 4 月を基準とした年度別各月における各回転数の燃料消費量増加率の推移
(左図が 1200rpm, 右図が 1700rpm)

3.4 船底塗料の変更と船底汚損低減の効果に関する考察

表 2 は各年の船底清掃時期および経費と使用された船底塗料の種類を示したもので，船底清掃の経費は△10 万円未満 (低額), ○10 万円から 30 万円 (中額), ◎30 万円以上 (高額) とした。船底塗料には 2009 年，2010 年は自己研磨型のものを，2011 年では自己研磨型と加水分解型の船底塗料を使用し，2012 年および 2013 年では加水分解型のものだけを使用していた。

表 2 各年の船底清掃時期および経費と，使用された船底塗料の種類

船底清掃の時期		経費	塗料会社	船底塗料の種類
2009年	9月	△	K社	自己研磨型
	10月	◎		
2010年	8月	◎	K社	自己研磨型
2011年	8月	△	K社、C社	自己研磨型、加水分解型
2012年	8月	○	C社	加水分解型
2013年	8月	○	C社	加水分解型

図 7 は 2011 年 1 月 (2010 年度) ドック入渠直後の船底汚損の様子である。2010 年 1 月のドックでは

自己研磨型の船底塗料を使用し，8 月に高額の経費をかけて船底清掃を行っている。写真から，船底に大量の付着物がつき，船底汚損が進んでいるのが分かる。今回は 2011 年の速力試験結果は示せなかったが，他の年度と比較して速力の低減，燃料消費量の増大はかなり大きなものであった可能性がある。

一方，図 8 は 2013 年 1 月（2012 年度）ドック入渠直後の船底汚損の様子である。2012 年 1 月のドックでは加水分解型の船底塗料を使用し，8 月に中額の船底清掃を行なった。写真からは，2010 年度と比較して付着物の量が少なく，汚損が抑えられていることが分かる。2012 年度において 8 月以降の速力の低減及び燃料消費量の増大が他の年度と比較して抑えられていたのはこのためではないかと考えられる。

今後，これらの違いを定量的に明らかにしていくことで船底塗料の変更に伴う船底汚損の防止の効果，さらにそれにともなって燃料消費量の低減に対する効果についてより詳細に検討していく必要がある。

図 7. 2011 年 1 月（2010 年度）ドック入渠直後の船底汚損の様子

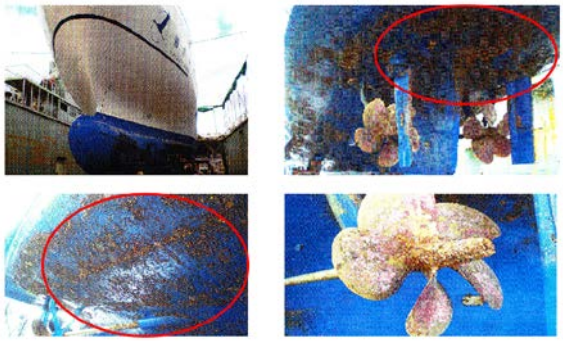


図 8. 2013 年 1 月（2012 年度）ドック入渠直後の船底汚損の様子

4. まとめ

燃料消費に伴う運航経費の低減を図るため，船底汚損が速力低下，燃料消費量の増大に与える影響，および船底塗料の変更による速力，燃費向上への効果を調べ，省エネ化を視野により効率的な船舶の運航に役立てることを目的に，軽合金製中型船の長崎大学水産学部付属練習船「鶴洋丸」において船底汚損の程度とドック出し後からの経過月による変化を速力試験により調査した。その結果，以下の点が明らかとなった。

1)速力試験の結果から速力・燃料消費ともに 6 月までは大きな変化(低減化)はなく 8 月頃から速力の減少，燃料消費量の増加が見られた。また、燃料消費量の増加率を回転数ごとに比較すると、どの回転数においても同月間で大きな差は見られなかった。

2)燃料消費量は 10 月と 11 月では近い値となった。また，2009 年，2012 年と 2013 年度の燃料消費量の増加率においても 10 月から 11 月の間に大きな差が見られないため，燃料消費量の増加率は船底汚損の進行が始まりだして 2～3 ヶ月後の 10 月ごろに最大となると考えられる。

3)船底塗料の変更前後で各年の船底汚損の様子を比較すると，2013 年 1 月入渠直後の様子は 2011 年 1 月期，及び 2012 年 1 月期のドックと比べ，汚損が大きく減少しており，新船底塗料の効果はあったと考えられる。

しかしながら 2013 年度は速力の減速率，燃料消費量の増加率はともに 2012 年度よりは大きい値となった。2013 年度は 2012 年度と船底塗料を変えていないため，速力の減少，燃料消費量の増加には，他の要因(泊地水温の高温化等)により 2012 年度よりも船底汚損が進行していた可能性も考えられる。

謝辞

本研究においてデータの取得に協力していた頂いた鶴洋丸乗組員の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

(1) 広田実・永野重隆：速力制御による燃料節約 IV，日本航海学会論文集，No.71，pp.167-176，1984.

(2)岩井聰：新訂操船論，海文堂，東京，pp.167-176，1986.

(3)合田政次・兼原壽生・高山久明・内田脩平：鶴洋丸の速力等に関する経月変化について,平成 22 年度日本航海学会春季大会海洋工学研究会資料

(4)木下宰・兼原壽生・下田真子・森井康宏・高山久明：アルミ合金船の速力と燃料消費量に関する考察，長崎大学水産学部研究報告，No.93，pp.11-17，2012.

大規模災害時における DTN 技術を用いた 複合的な船陸間災害情報共有ネットワークの提案と評価 －可搬型 DTN 基地局による検討－

正会員　霜田　一将（航海訓練所）　非会員　植田　啓文（日本電気株式会社）
非会員　木下　峻一（日本電気株式会社）　正会員　○加藤　浩（放送大学）

要旨

東日本大震災発生後、被災地では、携帯電話の基地局が被害を受けるなどし、通信網が使用できないことや、通信回線の輻輳により使用しにくくなることが発生していた。船舶は、電源設備をはじめ情報収集をするために必要となる衛星通信設備などを備えているため、大洋航海中でも新たな情報を取得・発信することが可能である。そこで、著者らは船舶を拠点とした海上からの情報支援ができれば、被災者と支援者間の情報共有を促し、安否の確認、円滑な救援活動や二次災害の防止に貢献できる新たな手法として期待できると考えた。大規模災害発生時に発生する孤立（劣）通信環境下でも効率的な通信を行う手段である DTN 技術に着目し、船舶を拠点とした船陸間災害情報共有ネットワークを構築することを目的とし、可搬型 DTN 基地局と DTN タブレット端末を用いた複合的な提案および通信実験による評価を行った。評価実験を通して、船舶を用いた新たな情報支援手法としての可能性を示す。

キーワード：通信、DTN、可搬型 DTN 基地局、大規模災害、情報支援

1. はじめに

航海訓練所の練習船は、多人数の実習生を受け入れ長期に渡る実習訓練を可能とする生活設備、供食設備、医療設備および人員が常時整えられている。東日本大震災では、海王丸と銀河丸が福島県いわき市小名浜港および岩手県宮古港に着岸し物資輸送、供食、入浴、健康相談などの救援活動を行った。水道などのライフラインが途絶え、入浴できない状況が続いていたため、練習船を用いた入浴の提供が非常に好評を得た。このように、東日本大震災のような甚大な災害時でも船舶を活用した海上からの救援活動が効果的であることがわかっている[(1)]。

東日本大震災発生直後、被災地では、地震、津波により携帯電話の基地局が被害を受け回線の途絶や、電線などの切断により大規模で長期間の停電などにより通信網が使用できないことや、通信回線の輻輳により使用しにくくなることが発生していた[(2)]。従来からのインターネット通信方式である TCP/IP（ Transmission Control Protocol/Internet Protocol）では、相互に通信する 2 箇所のエンド・ポイントが必ず存在することが前提である[(3)]。すなわち、通信回線がきわめて断続的、非常に高いロス率、非常に低速である場合では、必ずしも適切な通信方式ではない[(4)]。前述のような既存の TCP/IP が適用できない断続的な通信環境において、効率的な通信を行う手段として遅延耐性ネットワーク（DTN:Delay /Disruption/Disconnection Tolerant Network　以下、DTN）技術[(5)]が注目されている[(6)(7)]。DTN とは連続的な通信状態を想定せず、通信遅延が大きい・頻発するリンクの切断により発生する劣悪な通信環境でも、実用的な通信を実現する技術である[(8)]。

船舶は、電源設備をはじめ情報収集をするために必要となる無線設備、衛星通信設備などを備えており、このような通信環境が安定しない、孤立した状況にあっても比較的容易に情報収集および配信が可能である。前述のような通信環境が安定しない、または使用できない状況において、船舶を拠点とした海上からの情報支援ができれば、被災者と支援者間の情報共有を促し、安否の確認、円滑な救援活動や二次災害の防止に貢献できる新たな手法として期待できる。

そこで、本研究では、前述のような通信環境において船舶を用いた情報支援に着目し、船舶と孤立

（劣）通信環境間に DTN 技術を用いたネットワークを構築する目的として通信実験を行った。これにより、船舶で使用できる既存のインフラとそれに依存しないインフラの複合的な船陸間災害情報共有ネットワークの提案と評価を行う。

2. 提案構成

本研究では、船舶を拠点とし、DTN 通信を可能とするタブレット端末（以下、DTN タブレット端末）を人が所持し避難所（孤立または劣通信環境）を巡回することで、中継する端末としてデータを蓄積し転送する蓄積運搬型方式[9]による構成、情報共有の即時性を重視し、広範囲で DTN 通信を可能とする可搬型の基地局（以下、可搬型 DTN 基地局）を利用した構成およびそれらを複合した構成を述べる。

2.1 DTN タブレット端末を用いた構成

船舶を拠点とし、複数の人間が徒歩または車両で被災地に入り、情報支援を行うことを想定した構成を述べる。船内で、無線通信設備や衛星通信設備を用いて被災地で有益となる気象情報・安否情報などを収集する。取得した情報を DTN タブレット端末に保存､その後､各避難所を徒歩または車両で巡回し、DTN 技術の蓄積運搬方式の機能により情報提供を行う。また、各避難所で不足している物資や要望などは、新たな情報として DTN タブレット端末に保存する。巡回途中、別の DTN タブレット端末所持者とすれ違う際に近距離無線通信機能で接続し、お互いに新しい情報を共有することを可能とする。

2.2 可搬型 DTN 基地局を用いた構成

2.1 で述べたような DTN タブレット端末のみの構成の場合、船内で取得した新しい情報を各端末に配信するためには、新しい情報を取得済みの DTN タブレット端末所持者と巡回時にすれ違う、または船舶に戻る必要がある。そこで、船舶と避難所との間を長距離無線で接続し、広範囲で情報支援を行うことを想定した構成を述べる。船上および各避難所に可搬型 DTN 基地局を設置する。船内で取得した情報を船上の可搬型 DTN 基地局を経由し、各避難所に設置した可搬型 DTN 基地局へ配信する。これにより、船上の可搬型 DTN 基地局の通信範囲内にある可搬型 DTN 基地局とであれば船上で取得した情報を共有可能とする。また、可搬型 DTN 基地局を移動することで蓄積運搬方式による情報共有も可能とする。

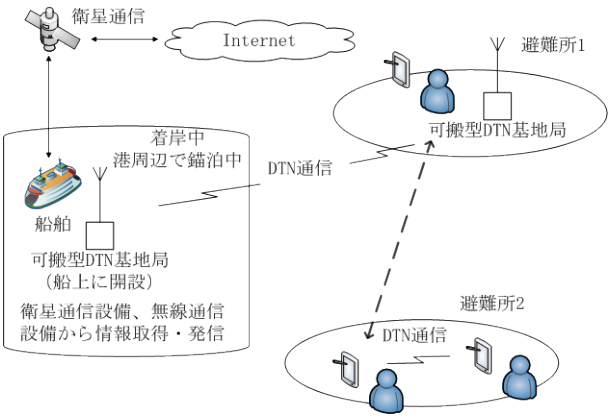


図 1　提案する複合構成

2.3 DTN タブレット端末および可搬型 DTN 基地局を用いた複合構成

DTN タブレット端末と可搬型 DTN 基地局を併用した複合構成を述べる。船上の可搬型 DTN 基地局と避難所 1 の可搬型 DTN 基地局は直接通信可能であるが、避難所 2 とはそれぞれ直接通信する手段がなく孤立通信環境であると想定する。この場合でも、図 1 に示すように DTN タブレット端末に情報を保存し、避難所 1 から避難所 2 へ徒歩または車両で移動することで情報源の船舶に戻らずに、蓄積運搬方式による情報共有を可能とする。

3. 通信実験と評価

本実験では船が停泊する港の岸壁に、船上の DTN 基地局を想定した可搬型 DTN 基地局を設置し、孤立（劣）通信環境となる各避難所を想定した複数の地域間で、既存のインフラとそれに依存しない複合的な情報共有について通信実験および評価を行った。

3.1 通信実験概要

平成 25 年 10 月 22 日～24 日、宮城県石巻市の石巻港にて通信実験を行った。使用した可搬型 DTN 基地局の無線仕様を表 1 に示す。周波数は、波長が 1～10m で、山や建物の陰にもある程度回り込んで伝えることができる VHF 帯の 260MHz を採用した。アンテナは、動揺のある船上に可搬型 DTN 基地局の設置を想定していること、避難所にアンテナを設置する際にアンテナの向きの調整が不要なことなどから無指向性を使用した。

図 2 に DTN 基地局の設置点を示す。船上 DTN 基地局を想定し、石巻港岸壁（標高約 4.6m）に可搬型 DTN 基地局（想定船上局）を設置した。次に、可搬型 DTN 基地局（想定船上局）から約 0.7km の地点にある石

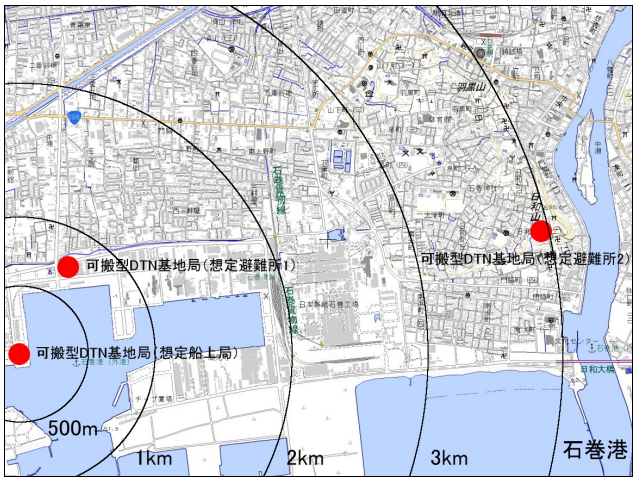


図 2　可搬型 DTN 基地局の配置図
この地図は国土地理院の地図閲覧サービスを利用したものである。

表 1　可搬型 DTN 基地局の無線仕様

周波数	260MHz帯
空中線	無指向性
利得	0dBi
空中線電力	5W

巻港湾合同庁舎屋上（標高約 20.0m）を避難所 1 と想定し、可搬型 DTN 基地局（想定避難所 1）を設置した。また、可搬型 DTN 基地局（想定船上局）から約 3.9km の地点に位置する日和山公園（標高約 46.5m）を避難所 2 と想定し、可搬型 DTN 基地局（想定避難所 2）を設置した。各可搬型 DTN 基地局には DTN タブレット端末を配置した。

3.2　実験 1

可搬型 DTN 基地局間の実効スループット、パケットロス率および RSSI（Received Signal Strength Indicator)の関係を計測する目的とし通信実験行い評価した。32kB のデータを 1 秒間隔で送信し、実効スループットおよびパケットロス率を計測、RSSI も同様に 1 秒間隔で計測した。計測する可搬型 DTN 基地局間を､次のようにケース 1 およびケース 2 とし、各避難所に可搬型 DTN 基地局を固定した運用を想定し、実験を行った。

・ケース 1
　可搬型 DTN 基地局（想定船上局）と
　可搬型 DTN 基地局（想定避難所 1）間
・ケース 2
　可搬型 DTN 基地局（想定避難所 1）と
　可搬型 DTN 基地局（想定避難所 2）間

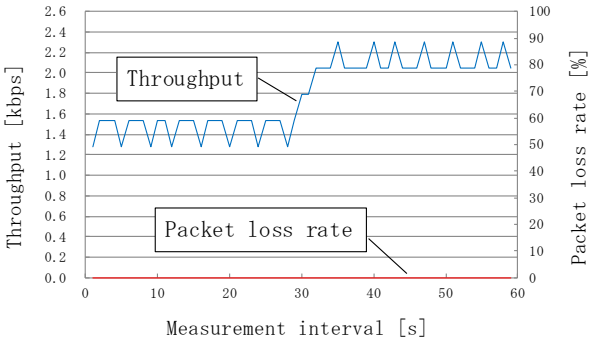


図 3　ケース 1：実効スループットとパケットロス率

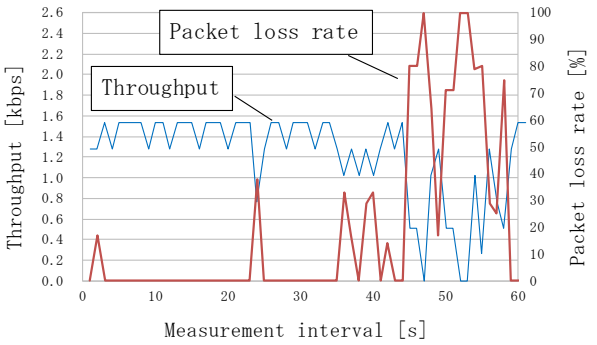


図 4　ケース 2：実効スループットとパケットロス率

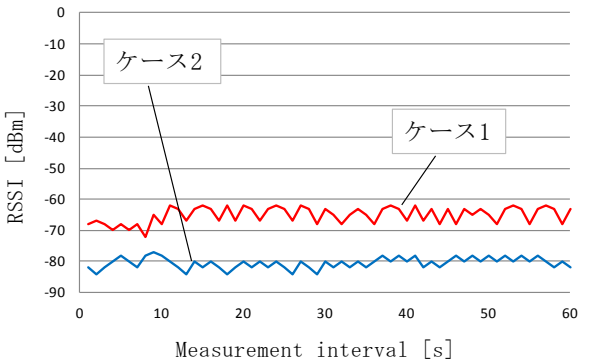


図 5　ケース 1 とケース 2 の RSSI

図 3 および図 4 はケース 1 およびケース 2 の経過時間を横軸とした、実効スループットとパケットロス率の計測結果である。また、図 5 は、経過時間を横軸とした、それぞれの RSSI の計測結果である。

ケース 1 では、安定した実効スループットが得られ平均で 1.7kbps、パケットロス率は 0%であった。ケース 2 では、実効スループットは 1.2kbps、パケットロス率は 19%であった。次に、計測した RSSI の中央値について、比較した。ケース 1 は-64dBm で、ケース 2 は-80dBm と 16dBm の差がみられた。

3.3　実験 2

避難所に設置する可搬型 DTN 基地局間では地理的条件などによりケース 2 のような RSSI が低く、パケットロス率が高いなどの劣通信環境となることも考えられる。ケース 2 を用いて、二次災害防止などの観点から避難所で必要となる情報の 1 つであり、船舶に搭載されている衛星通信設備や無線通信設備で情報収集が可能な天気図を画像データ（40kb）として送信し、劣通信環境下での情報共有の可否について通信実験を行い評価した。

想定避難所 2 に設置した可搬型 DTN 基地局で受信し、DTN タブレット端末で天気図を閲覧している様子を図 6 に示す。

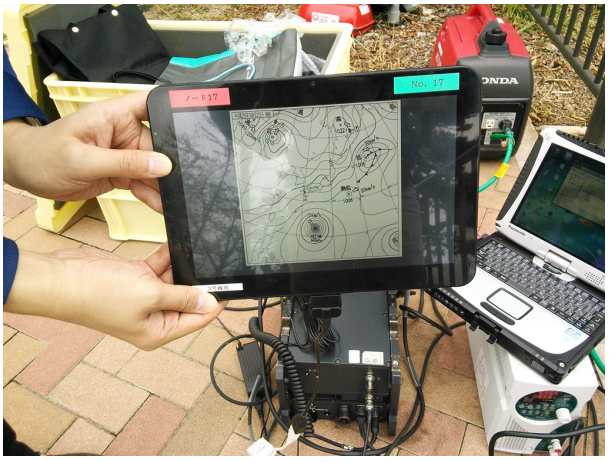


図 6　劣通信環境下での情報共有

4. まとめ

本研究では、大規模災害が発生した際に想定される孤立（劣）通信環境下で、船舶を拠点とした情報共有について提案した。提案した構成の中でも、可搬型 DTN 基地局を船上に設置し、各避難所に設置した可搬型 DTN 基地局間を無線で接続する構成を、DTN タブレット端末を併用する複合的な構成とすることで、地理的条件などにより無線で接続することが難しい山間部などでも情報共有を可能とし、情報共有の広がりを持たせた提案構成となった。

実験 1・ケース 1 では、パケットロスもなく安定した通信が行えることを確認したものの、電界強度は距離の 2 乗に反比例し、減衰するため、ケース 2 では安定した通信を行える RSSI を下回り、パケットロス率が上がったものと考える。実験 2 では、実際に船舶で取得できる天気図のデータを用いた実験により、地理的条件などでパケットロス率が高い劣通信環境下でも、ファイルを断片化し送出可能な DTN 技術を用いることにより情報共有の可能性があることを示した。船舶に搭載されている衛星通信設備や無線通信設備と著者らが提案する手法は、大規模災害発生後に、船舶を拠点とし被災者と支援者間の情報共有を促し、安否の確認、円滑な救援活動や二次災害の防止に貢献できると考える。

船上に開設できる無線局は、電波法などにより目的や通信の相手方が定められている。船上に開設できる無線局を実験局として取得したものの、平成 25 年度は台風の影響により実際に船上に開設しての実験を行うことができなかった。今後、電波法などの改正により船陸間で使用できる新たな周波数の解放も見込まれることから、船陸間での実験も視野にいれていきたい。

5. 参考文献

(1) 阪根靖彦：東日本大震災における航海訓練所練習船の救援活動，日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 47 巻, 第 2 号, p. 189, 2012. 3.

(2) 総務省：東日本大震災における情報通信の状況, 平成 23 年度版情報通信白書, p. 2, 2012. 7.

(3) W. Richard Stevens：詳細 TCP/IP, p. 256, ソフトバンク株式会社, 1997. 3.

(4) 永田晃・山村新也・鶴正人：DTN 技術がもたらす大域情報流通基盤, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2011 年通信(2), p. 123, 2011. 2.

(5) The Delay-Tolerant Networking Research Group：https://sites.google.com/site/dtnresgroup/, 2014. 01.

(6) 山崎康広・植田啓文・小倉一峰・山垣則夫・藤田範人：災害時利用を想定した DTN 分散型情報共有システムの開発とそのフィールド実証実験, 電子情報通信学会 信学技報, p. 31, 2013. 5.

(7) 植田啓文・藤田範人：DTN におけるノード分布推定に基づくコンテンツ複製配置方式, 電子情報通信学会 信学技報, pp. 49-54, 2009. 5.

(8) 陶山優一・横田裕介・大久保英嗣：移動端末を用いた災害情報システムにおける DTN ルーティング手法, 電子情報通信学会 信学技報, p. 118, 2009. 1.

(9) 金田知展・中村嘉隆・高橋修：DTN を用いた災害時通信システム構築法の提案, 情報処理学会, シンポジウムシリーズ, 2013 巻, 2 号, p. 964, 2013. 7.

船舶でのインターネット接続環境の構築と評価
－定額制モバイルデータ通信の効率的な利用－

正会員○霜田　一将（航海訓練所）　非会員　渡部　翔（航海訓練所）
非会員　坂　利明（航海訓練所）　正会員　鈴木　治（鳥羽商船高等専門学校）

要旨

船舶からインターネットを利用する際には無線回線を利用するため、陸上のような高速回線を利用することは難しい。昨今、モバイルデータ通信の利用者の増加に伴い、通信料金が定額制で、無線回線としては高速な下り数十 Mbps の通信速度が提供されるものもある。そこで本稿では、各移動体通信事業者が提供する定額制のモバイルデータ通信を船陸間で効率的に利用することを可能とするシステム構築を提案する。まず、鳥羽商船高等専門学校の学生寮のインターネット環境を利用して船陸間を想定した通信実験を行った。次に、これにより得られた結果から、各移動体通信事業者から提供されるモバイルデータ通信を用いて、沿岸航海中の航海訓練所の大成丸に、現時点での高速モバイルデータ通信を含む実験システムを構築し、通信実験を行い評価した。また、定係地に着岸中の鳥羽商船高等専門学校の鳥羽丸で陸上回線からモバイルデータ通信への切り替え手法について検討を行った。評価実験を通して、沿岸航海中および着岸中における本提案である対外回線数の制限、負荷分散および回線の自動切り替えの有効性が確認された。

キーワード：通信、船陸間通信、モバイルデータ通信、負荷分散、QoS

1. はじめに

航海訓練所「大成丸」（全長 125m　5,887 総トン）と鳥羽商船高等専門学校「鳥羽丸」（全長 40m　244 総トン）では、定額料金で利用可能なモバイルデータ通信（以下、データ通信）を利用し、海上交通流の調査を目的とした自動的にデータを収集するシステムを構築していた [(1)]。これらの練習船では、船内 LAN が構築されており、船内外からのデータを運航のために活用できるようになっている。

沿岸航海中の船外との通信には、各移動体通信事業者から提供されている最大では下り数十 Mbps の高速なデータ通信がある [(2)] が、陸上の回線と比べ、1/10～数百/1 程度と低速で、サービスエリアには制限がある。そこで、この環境下で効率的にインターネットの利用をするためのシステム構築手法を提案する。

まず、船舶に適用する前に鳥羽商船高等専門学校の学生寮で船陸間を想定した通信実験を行い、多数のクライアントに対する対処法を調査した。次に、データ通信を利用した実験システムを大成丸に構築し、通信実験を行い評価した。また、定係地に着岸中の鳥羽丸で回線の切り替え手法について検討を行った。これにより、沿岸航海中および着岸中における船陸間で、本提案手法による効率的なインターネットへの接続環境（Web 閲覧、メール送受信）の有効性が確認されたので、その手法を示す。

2. 船舶で利用できる回線の調査

船舶に搭載される回線は、衛星通信回線とデータ通信を代表とする地上系通信回線に分類できる [(3)]。データ通信は、通信速度が衛星通信より速く、下り数十 Mbytes の通信速度が提供されるものもある。また、衛星通信と比較すると数千円程度と低料金の定額制で提供されている。大成丸では 2003 年から、鳥羽丸では 2008 年より利用を開始している。

3. 船舶からのデータ通信の状況調査

著者らの乗船勤務経験から、船舶でデータ通信を利用した際の代表的な問題点を示す。①着岸中・港近傍での錨泊中など信号強度が十分な状態にも関わらず、Web ページの閲覧ができないことがある。②通信の途中で回線が切断されることがある。そこで、これらについて調査した。

3.1　信号強度が十分だが通信が不安定

前述の①について、船陸間を想定したシミュレーション環境を鳥羽商船高等専門学校の学生寮のネットワーク内に構築し、検証を行った。

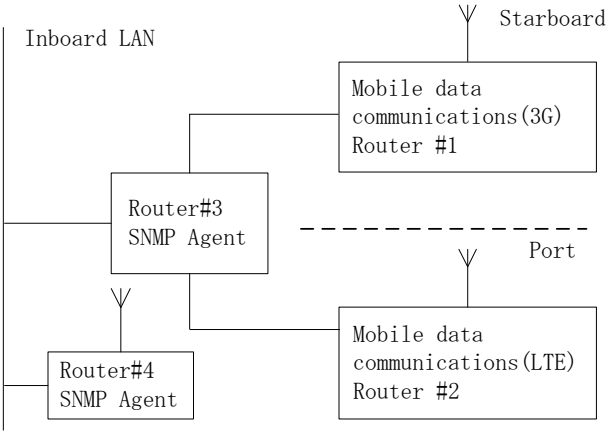


Fig.1 System configuration diagram on T.S. Taisei Maru

3.2 通信の途絶

前述の②について、2014 年 2 月 26 日、大成丸が神戸港（34-40N・135-11E）出港時から津名錨泊地（34-25N・134-55E）までの航海中に、Fig.1 に示すように、右舷と左舷にデータ通信を設置し、通信状態を計測した。計測方法は、船内に設置したルータ 3（アライドテレシス製 AR560S）を GW（Gate Way　以下、GW）とし、SNMP [4]（Simple Network Management Protocol）エージェントを起動し、データ通信用ルータ 1･2 への各インターフェースを通過するデータを CentOS 上にインストールした SNMP マネージャーで計測した。計測は抜錨前の 12 時から開始し、14 時 00 分に神戸出港、16 時 20 分に津名に錨泊するまでの間を含む 17 時 30 分まで行った。

3.3 結果

3.1 では、対外回線への接続数（NAT Descriptor masquerade sessions）が増加してくると、回線が断になっていないにも関わらず、全利用者で Web ページの閲覧ができない現象が確認された。そこで、2014 年 2 月 22 日、シミュレーション環境下で 1 つのクライアントあたりの対外回線の接続数を、4096 と 300 に変化させ、対外通信量を計測した。4096 では、最大値が 12.0Mbps を超えたものの、300 では 2.8Mbps と通信量の最大値を約 1/4 に低減することができた。対外回線への接続数が 300 を超えるような 2 割程度の利用者からは閲覧できないときがあるとも意見があったものの、全利用者が閲覧できないということには陥らないことがわかった。この結果、船陸間でデータ通信を使用する場合、陸上と同様に 1 つのクライアントあたりの対外回線の接続数を設定するのではなく、帯域幅が狭いことを考慮した設定をすることで QoS（Quality of Service）が確保できることが示唆された。

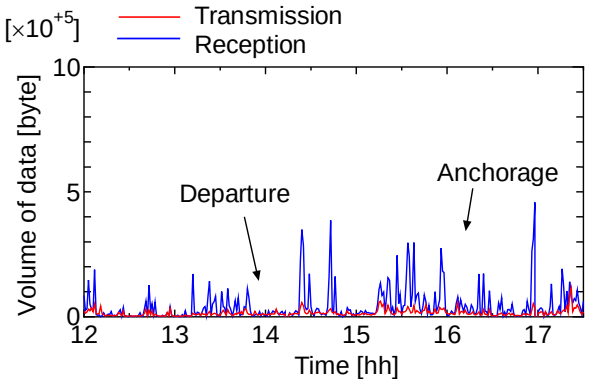


Fig.2 Mobile data communications of starboard

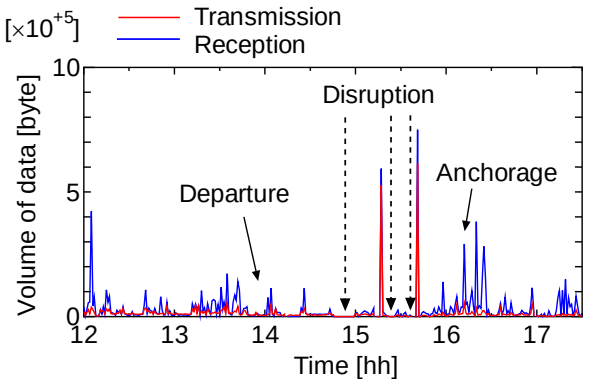


Fig.3 Mobile data communications of port

3.2 では、Fig.2 および Fig.3 に示すように、右舷左舷によりデータ通信の途絶回数に違いがあるのが確認された。これは、航海中に船体と陸上との関係や、海面からの電波の反射、船体が金属で覆われている、船内でのデータ通信の設置場所など様々な要因が複雑に関係していると推察する。特に直接波と海面反射波が逆位相だと信号を弱めあう [5] ことになり、データ通信が不安定または途絶・切断という状態に陥りやすい。また、右舷に使用したデータ通信は 3G（第 3 世代：3rd Generation　以下、3G）であり、左舷に使用したデータ通信は LTE（Long Term Evolution　以下、LTE）であるなど、使用した回線種別が接続状態の違いを生じさせていると推察する。

4. 複数の回線による冗長・可用化構成

前述のように船舶でデータ通信を使用する際は、不安定または途絶・切断という状態になることがある。そこで、陸上のネットワークでは経路を複数化することで冗長性を高め、または高速性を図り、さ

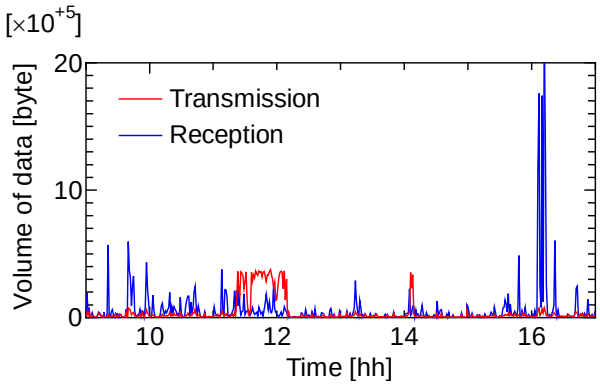


Fig.4 No.1 Mobile data communications

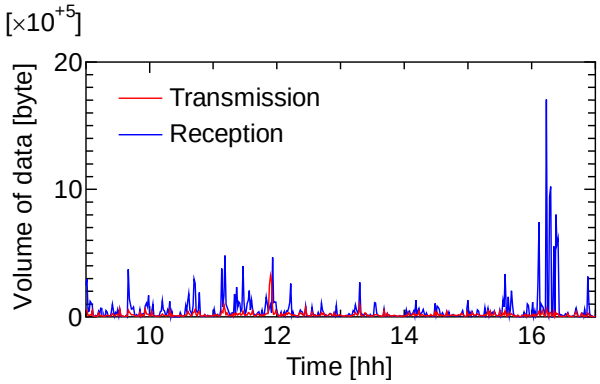


Fig.5 No.2 Mobile data communications

らに回線の切断に備えて可用性を高めているこの手法を船舶に用いて、船内の利用者の利便性を確保することを試みた。

4.1 複数回線による冗長化（大成丸）

大成丸は国内航海をする船舶としては比較的大型であり、クライアント間で情報共有を可能とする船内ネットワーク環境を備えている。この環境下に、第3章で述べたFig.1を使用し、複数のデータ通信を同時に利用した冗長化および負荷分散を目的とした実験システムを構築した。複数のデータ通信として、データ通信No.1（3G）とデータ通信No.2（LTE）の2回線を準備し、それぞれにデータ通信用のルータ1・2を併設した。第3章で述べたように、船舶ではデータ通信の設置場所により接続差が生じることがある。そこで、右舷にデータ通信No.1を設置、左舷にデータ通信No.2を設置したシステム構成とし、GWはルータ3を使用した。

4.2 自動負荷分散（大成丸）

4.1（Fig.1）の構成を用いて、大成丸の2014年2月20日、09時55分錨泊地坂手発(34-27N、134-18E)から14時55分神戸錨泊地着（34-36N、135-12E）の航海を含む09時00分～18時00分までの間において通常業務でのインターネット利用で発生するデータの送受信量を計測した。

Fig.4およびFig.5に、横軸を時刻、縦軸をデータ量としたデータ通信No.1およびデータ通信No.2の送受信量を示す。

Table 1 Relations of number of NAT descriptor masquerade sessions and RTT

Sessions limit	2,000	300
Sessions time out [s]	3,600	30
Sessions(Maximum)	1,827	263
Sessions(Median)	667	51
RTT(Maximum) [ms]	1,945	1,939
RTT(Median) [ms]	244	156

4.3 冗長化と自動負荷分散の結果（大成丸）

データ通信を右舷および左舷に設置し、2回線を同時に利用することで、回線の冗長化が可能であることがわかった。負荷の分散状況においても、概ね均等に分散されているのがわかる。1回線で多くのデータを送受信するのではなく、2回線を同時に使うことで負荷をそれぞれの回線に分散している。これにより、船陸間に擬似的に2回線分の帯域を持った1回線を構築することができた。ゆえに、片方の回線が途絶・断であっても、船内の利用者はそのことに気づかずに、もう一方の回線でインターネット接続を保つことができるようになる。

4.4 対外回線数の制御（大成丸）

2014年3月5日、館山錨泊中（35-00N、139-49E）に通常のインターネット利用中での対外回線数について、ルータ4（ヤマハ製RTX1200）をGWとして計測した。計測結果をTable 1に示す。

ルータ4に対外回線数を制限する設定をすることで、対外回線数を抑制することができることがわかった。データ通信の数十Mbpsという帯域を、今回の測定で確認できた最大対外回線数1,827で分け合うよりも、制限をした際の最大対外回線数263で分け合うほうが、帯域の占有率を約1/7に低減できる。また、対外回線の保持時間を短くし、開放を促すことにより、新しい対外回線数の作成余地を作り出すことが可能となった。本実験の環境下のRTT（往復遅延時間：Round Trip Time）については、最大値には大きな違いは確認されなかったものの、対外回線数を低く抑えることで、中間値で約100ms速くなる

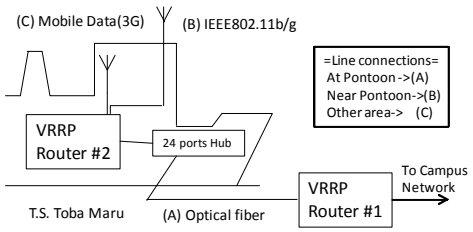


Fig.6 Connection diagram of ship to shore with VRRP router and 3G mobile data communications on T.S. Toba Maru

ことが確認できた。

4.5 回線切り替えの自動化（鳥羽丸）

鳥羽丸では、航行中の船陸間は、データ通信、定係地付近の海面では、データ通信より高速な無線LAN (IEEE802.11b/g)、定係地では光回線を使った校内LANに接続ができる。これらの回線切り替えは今まで手動で行っていたが、ルータの設定をその都度書き換える必要があるなど、専門知識を要し、作業が煩雑であった。そこで、それらの回線を自動的に判別し、切り替えを行うシステムを構築した。その仕組みを Fig.6 に示す。陸上と船内に VRRP[6] (Virtual Router Redundancy Protocol)機能を持つルータ1･2(センチュリーシステム製XR510とXR430)を配置し､船内からVRRPルータの有無により対外的に通信をできるようにした。VRRPは仮想ルータを設定することができるので、船内にあるクライアントのGWの設定を仮想ルータとすることで､回線の切り替えが自動化でき､端末の設定変更は不要となった。

5. 考察

今回の大成丸と鳥羽丸の実船による各地での調査から、航海中はデータ通信を設置した舷の違いにより、右舷のデータ通信では通信可能であるが、左舷のデータ通信では通信ができないという設置舷での通信品質の違いが確認された。また、著者らの経験から信号強度が十分であってもデータ通信ができないことがしばしば発生していることがわかっている。このような場合は、物理的に回線を切り替えるなどの対応をし、船内からインターネットが利用できるように努めてきた。しかし、この手法では人手が必要で他の船舶には適用が難しかった。提案する手法では、船内からのインターネット接続が増加しても一方の回線にのみ負荷が集中することなく、事前に定めた比率による負荷分散の仕組みと、航行海域、船体の動揺など船舶特有の条件および使用するデータ通信の種別の違いにより、一方の回線が断やデータ通信できない状態となっても回線の冗長化により、自動的に適切な船陸間におけるデータ通信の運用が可能となった。また、定係地での回線の切り替えも自動化できた。

今回の用いた手法は、陸上で用いられてきた手法であるため、標準的にシステムベンダーにシステム設計を依頼すると大型な機器の設置を提案されることが多い。今回著者らが構築したシステムでは、16ポート程度のHUBと小型ルータで構築が可能であり、これは大型練習船だけでなく小型の内航船でも十分流用できるシステムであるといえる。

6. まとめ

回線の冗長化および負荷分散が実現したことにより、船陸間の安定した通信が可能となった。今後、船陸間でもクラウドを利用したシステム構築に向けた、基礎を構築できたと考える。船陸間それぞれでクラウド化が進むことは、航海をする船舶を含め、システムの一元管理ができる可能性がある。引き続き、船陸間におけるインターネット接続環境の改善に取り組むこととしたい。

7. 謝辞

実験に際してご協力頂いた皆様に感謝いたします。

8. 参考文献

(1) 鈴木治・田中友規・浪江宏宗・藤井肇：海上交通流把握のための陸と船からのデータ収集システム，日本航海学会論文集，123号, p.111, 2010.9.25.
(2) 特許庁：平成 23 年度特許出願技術動向調査報告書（概要） 携帯高速通信技術（LTE），p.1, 2012.4.
(3) 鈴木治：放送やインターネットの利用とその環境, RF ワールド, No.21, pp.62-63, 2013.02.
(4) S.Nadas・Ed.Ericsson：IETF, Virtual Router Redundancy Protocol(VRRP), RFC5798, 2010.03.
(5) 総務省：災害時における携帯電話基地局の船上開設に向けた調査検討, 実地試験結果報告（KDDI），参考資料 2, p.33, 2013.02.
(6) J.Case・M.Fedor・M.Schoffstall・J.Davin：IETF, A Simple Network Management Protocol (SNMP), RFC1157, 1990.03.

東京湾・浦賀水道海上における 3G 電波強度調査

正会員○大島　浩太（埼玉工業大学）　正会員　古谷　雅理（東京海洋大学）
正会員　竹本　孝弘（東京海洋大学）　正会員　庄司　るり（東京海洋大学）

要旨

船舶の安全な航行を支援するにあたり、海難事故の早急な発見と救助は人命救助の観点で重要である。船舶自動識別装置(AIS)は大型船舶間の防災には非常に有効であるが、搭載が義務化されていない小型船舶に関係した多くの事故が発生しているのが現状である。我々は、東京湾のような陸が近い海上で 3G 通信が可能である点に着目し、小型船舶の防災・減災を目的とした海難救助システムの開発を進めている。システムの実現にあたり、海上で 3G 通信がどのように利用できるかを検討するための 3G 電波強度の調査実験を実施した。本稿では、調査実験の結果と、結果を踏まえた海難救助システムの要件定義と設計について報告する。

キーワード：事故、3G 電波強度計測、海難検知、GPS 測位

1. はじめに

海上保安庁の発表[(1)]によると平成 24 年の船舶事故に伴う死者・行方不明者数は 78 人で、船舶種類別では、過去 5 年間を通じて常に漁船が最も多い。プレジャーボートや漁船等の小型船舶の事故が全体の約 7 割を占めており、これらの原因としては「気象・海象の不注意」「見張り不十分」「地理的不案内や水路情報の不足」が 6 割を占めている[(2)]。

船舶事故に伴う死者・行方不明者数の減少には、早急に船舶事故を通知し捜索に繋げることが重要である。海難の防止には、船舶自動識別装置(AIS)を用いて常時船舶の位置を監視し、航路の交通状況を把握する手段が有効である。しかしながら、高価であるため、搭載が義務化されていない小型船舶ではほとんど利用されていないのが現状である。電波の出力が小さく AIS に比べて安価な簡易型 AIS も存在するが、こちらも小型船舶への搭載は義務化されていない。

衛星を利用した捜索システムとして、コスパス・サーサット（Cosmicheskaya Systyema Poiska Aariynyich Sudov:COSPAS　Search And Rescue Satellite Aided Tracking:SARSAT）[(3)]が運用されており、通知装置として SOS 信号、緯度経度情報を送信する Cospas-Sarsat Beacon が提供されている。しかしながら、安価な機器が提供されていないため導入が難しい。また、海上保安庁では、海中転落者の海上における生存可能時間や当庁が救助に要する時間等を勘案し、生存状態で救助するために、海難発生から当庁が情報を入手するまでの所要時間を 2 時間以内にすることを目標としている[(2)]。

このような背景を受け、漁船、プレジャーボート利用者が導入しやすく、かつ海難事故発生時の早期発見による人命救助に効果的なシステムを検討する。システム開発のために、東京湾や浦賀水道などの陸地から近い近海エリアにおいて 3G 通信が利用できる場合があることに着目し、3G 通信がどの程度利用できるのかに関する調査実験を実施した。3G 通信は AIS で利用している電波よりも通信可能距離は短いものの、双方向性を持った通信が可能である。そのため、この通信特性を活かしたこれまでには無い利便性を備えた海難事故救助システムの実現が可能になると考えられる。例えば、被災者に対して減災につながる情報を提供する、海難事故の自動検知と自動通報機能などがある。通報先はインターネットや携帯電話網に接続されている端末であれば良いので、幅広い対象を選択することができる。

本稿では、調査実験結果を通じて近海の海上の 3G 通信の特性を明らかにし、3G 通信利用型の海難事故救助システムの要件定義と設計のための調査について述べる。

2. 実験概要

2.1　実験機材

実験機材を図 1 に示す。左は、マイクロコントローラと、それに 3G 通信機能を付与する 3G シールドを用いて開発した、3G 電波強度と GPS による位置情報を SD カードに記録するシステムである。これを、アンテナを外に出せるよう加工した耐環境ボックス

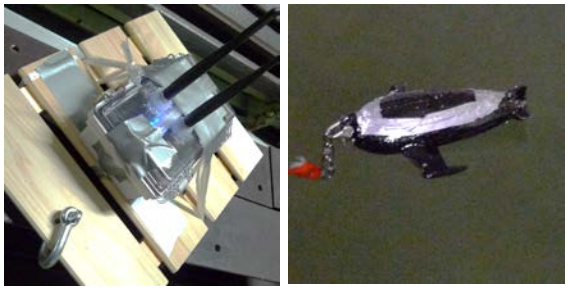


図 1 実験機材の外観

に格納し、浮力確保のため板に設置した。右は、3D プリンタで出力した PLA 製のケース内に Android 携帯端末を格納したものである。携帯端末には 3G 電波強度の計測と GPS 測位機能が備わっており、開発した Android アプリケーションにてそれらの計測値を記録するシステムとした。

2.2 実験詳細

2.2.1 東京湾での実験 1

落水者を想定した海面を浮遊する物体の 3G 電波通信性能を調査するために、図 1 の機材を小型ボート（東京海洋大学所有、ちどり）で曳航する実験を 2014 年 1 月 20 日に東京湾で実施した。実験は、まず機材を小型ボートの船上に置いた状態で東京湾の沖まで移動し、海面にそれぞれの機材を投下した。投下後、機材を海面に浮かべた状態で牽引することで、移動経路の海面の 3G 電波強度と位置情報を測定した。測定中に機材は、水面下に全て隠れる、波をかぶる、水上に出ている状態のいずれかであった。天候は晴天であった。

2.2.2 東京湾での実験 2

海上の 3G 電波通信性能を幅広く調査するために、図 1・左の機材と、図 1・右の機材の中の携帯端末を用いた計測実験を実施した。実験機材は汐路丸のコンパスデッキ（水面から 10m）に設置した。実験は 2014 年 1 月 21 日～23 日に、勝どきから館山を往復する汐路丸(東京海洋大学所有練習船)上で行った。機材は汐路丸の航行中に航海船橋甲板に設置し、錨泊中は機材を回収するという実験手順を採った。天候はいずれの日も晴天であった。

3. 実験結果

前述した小型船舶・大型船舶での実験で計測した 3G 電波強度と位置情報を地図にマッピングすることで実験結果の可視化を行った。3G 電波強度は強さ

図 2 マイクロコントローラ利用実験（小型ボート）

に応じて表 1 のように色分けした。この色分けは、実験で使用した機材が通信に利用する携帯電話事業者の基準を用いた。なお、-130dBm より弱い電波は通常圏外として扱われる。

表 1 3G 電波強度の色分け基準

電波強度の範囲(dBm)	色
-50～-78	
-78～-88	
-88～-99	
-99～-107	
-107～-130	
-130～	

なお、GPS の測位精度については、実験機材と船舶に設置された高精度な GPS の測位結果を比較し、誤差が小さいことを確認している。

3.1 東京湾実験結果 1

図 2, 3 に、小型ボートを利用した東京湾内での 3G 電波強度の実験結果を示す。図中で示している箇所で海面への投下と回収を行った。

実験結果から、陸に近い場所では電波強度は中程度であるが、陸から離れた場所では圏外にならない程度の弱い電波強度を観測した。マイクロコントローラと携帯端末では電波強度が異なっているが、これは、マイクロコントローラは 15cm 程度のアンテナを利用しており、電波の受信感度が携帯端末に比べて良いからと考えられる。さらに結果からは、同一の区分の電波強度が連続していることが分かる。

図 3 携帯端末利用実験(小型ボート)

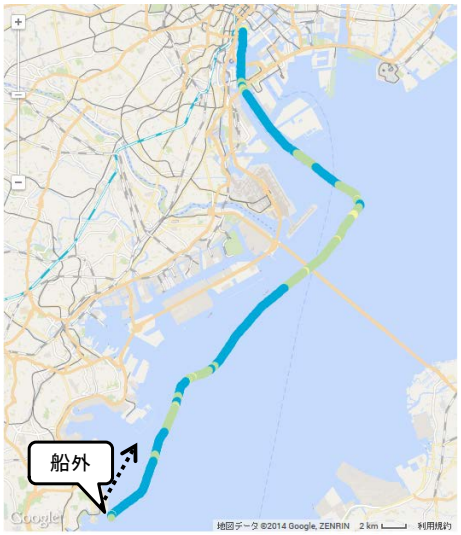


図 5 マイクロコントローラ利用実験(汐路丸)
(2014 年 1 月 23 日実施)

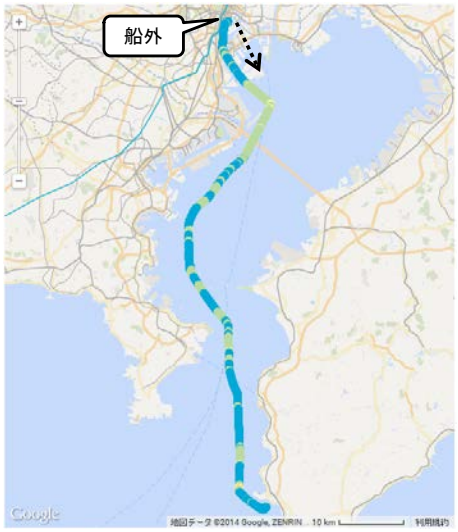


図 4 マイクロコントローラ利用実験(汐路丸)
(2014 年 1 月 21 日実施)

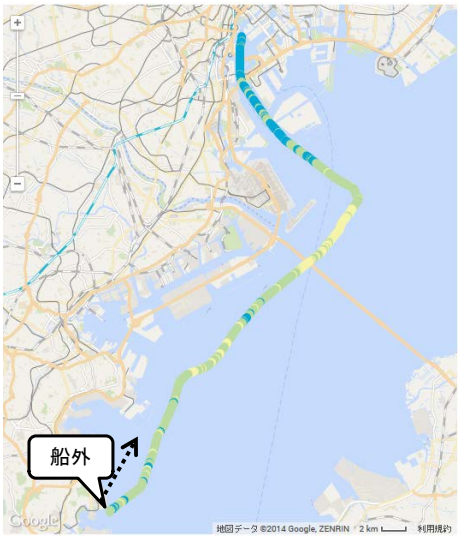


図 6 携帯端末利用実験(汐路丸)
(2014 年 1 月 23 日実施)

3.2 東京湾実験結果 2

図 4 に、勝どきから館山まで航行する汐路丸のコンパスデッキに設置したマイクロコントローラによる計測結果を可視化した結果を示す。図 5, 6 は、横須賀から勝どきに向けて航行した際のマイクロコントローラと携帯端末での実験結果を示している。

図 4 から、海面より 10m 程度の場所では強い電波強度を計測できていることが分かる。またこの結果を図 2 と比較すると、海面に浮かべた状態よりも甲板に設置した状態の方が強い電波強度を計測していることが分かる。これは、海面付近で電波強度は減衰するが、高さを確保すれば品質の良い通信が可能であることを意味している。

図 5, 6 からは、マイクロコントローラと携帯端末では、それぞれ良い電波強度を計測している。しかしながら、図 2, 3 の結果で見られたように、マイクロコントローラで計測した電波強度の方が強くなっている。

3.3 実験結果からの考察

実験結果から、東京湾や浦賀水道の 3G 電波強度は、次のような特徴を備えていると推察できる。

- 電波強度には違いがあるものの、東京湾および浦賀水道では 3G 電波を受信することが可能
- -107dBm より強い電波強度を計測しているエリアが多く存在

- 海面付近で 3G 通信は可能であるが、アンテナの海面からの高さを確保すれば通信性能が向上する

4. 提案システム検討

4.1 海難救助システムの要件

小型船舶のための海難救助システムの要件定義を行うにあたり、我々は次の項目が重要であると考えている。

- 漁場秘匿などの観点から AIS のような常時位置情報を通信しなくても利用可能
- 海難時に人命救助に有効な情報を提供可能
- 被災者に対して減災につながる機能の実現
- 安価な導入・運用コスト

4.2 海難救助システム概要

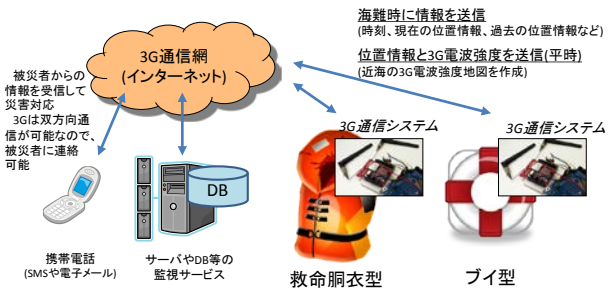


図 7 提案する海難救助システム概要

3G 通信を利用することで可能になる海難救助システムの概要を図 7 に示す。提案システムは、人が装着する救命胴衣と船に設置するブイの 2 つのタイプを検討している。これらに、マイクロコントローラで開発した 3G 通信システムを備える。落水時に自動で起動し、現在と直近の過去の位置情報を 3G 通信網経由で陸上に送信する。電波強度の計測実験から、電波が弱いエリアで大容量のデータを送信することは難しいと考えられるため、電波強度に応じて送信内容を変化させる。

また、3G 通信は双方向通信が可能である。そのため、超小型モニタなどを装着しておけば、陸上から被災者に指示が可能になると考えられる。さらに、近海の 3G 電波強度地図を平時に作成しておけば、3G 通信が利用できない場所での被災者に通信可能なエリアを提示できると考えられる。他にも、LED を搭載しておけば夜間での発見可能性を高めることができると考えられる。このような恩恵は、3G が双方向通信可能であること、マイクロコントローラは様々な電子機器を容易に接続と制御可能であることに起因している。

5. おわりに

本稿では、海難救助システムの要件定義や設計を行うにあたり、3G 通信が近海で利用できる可能性がある点に着目し、その通信性能に関する東京湾・浦賀水道における調査実験を報告した。実験からは、電波強度の弱いエリアも存在するが、3G 通信を海難救助システムに利用可能である見通しを得た。

3G 通信が海難事故の発見に利用できれば、正確な位置と履歴の発信、被災者への連絡もできる。そのため、被災者の早期発見効果が期待できる。さらに、安価に導入できる電子基板や、導入コストの低いデータ通信専用の SIM カードの登場により、3G 通信を用いる機器は安価なものにすることができると考えている。したがって、価格面での普及効果も狙えるため、安全な航行支援という面で船の世界に大きく貢献できるものと考えられる。

今後は、さらなる 3G 電波の調査実験や、設計したシステムの実現に向けさらなる研究を進めていく。システムは、3G 電波計測実験で利用したマイクロコントローラへの機能追加で容易に実現可能であるため、早急な試作の開発と性能検証を実施する予定である。

参考文献

(1) 海上保安庁: 海上保安レポート 2013, 2013.5.
(2) 海上保安庁: 海難の現況と対策について(平成 24 年版), http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h25/k20130328/k130328-honpen.pdf, 2012.3.
(3) The International Cospas-Sarsat Programme : https://cospas-sarsat.org/index.php

AISバイナリメッセージを用いた見張り情報の共有

正会員　松本　洋平（東京海洋大学）

要旨

ARPA(Automatic Radar Plotting Aid)で捕捉した船舶の位置・速度を AIS(Automatic Identification System)バイナリメッセージとして送信するシステムを作った。また、実際に、このシステムを用いて、レーダーおよびAIS トランスポンダを装備した船舶からAIS を搭載しない小型船舶を捕捉しその位置・速度を送信する実験を行った。その実験結果を報告する。

キーワード：電波航法・通信、AIS、バイナリメッセージ

1. はじめに

現在AIS は搭載義務船に限らず、多くの船舶に搭載されており、航海の安全、あるいは、港湾の安全に寄与している。通信トラフィックの混雑に伴い次世代 AIS の仕様が検討されてきたが、これはIMO(International Maritime Organization)に受理されず、現在 IALA(International Association of Lighthouse Authorities)およびITU(International Telecommunication Union)では VDES(VHF Data Exchange System)として現行のAIS を含むより一般的なデータ交換システムへ発展させる検討が行われている。

VDES の中にはASM [1] (Application Specific Message)用の追加の通信チャネルの設定も想定されており(1)、その実現を確かにするためには、ASMの応用に関するさらなる研究を行う必要がある。

本研究ではASM の応用のひとつとして「見張り情報の共有」を挙げ、その実際的な方法の模索と試作、評価を行う。

2. 見張り情報の共有

船舶の衝突事故の主要な原因は見張り不十分であるとされており、また、プレジャーボート等の小型船舶による事故が多い。通常、小型船舶はAIS 搭載義務がなく、それらのAIS 非搭載船舶は基本的に目視かレーダーによる見張りによって発見しなくてはならない。レーダーや十分な人員による高度な見張り機能を備えた VTS(Vessel Traffic Service)やクラス A AIS 搭載船舶（以下、*見張り局*）からAIS 非搭載船舶を捕捉し、その航行情報をAIS バイナリメッセージとして放送して船舶間で共有すれば、小型船舶に対する見張りを強化することができる。また、AIS 非搭載船舶においても、比較的安価な送信機能を持たないAIS 受信機さえ装備すれば、放送された情報によって周辺のAIS 非搭載船舶の動静を知ることができるようになり、安全な航海の補助になると考えられる。AIS 受信機を用いた小型船用見張り支援システムに関する検討は文献(2)に詳しい。

[1] 現行のバイナリメッセージ(Message 6,7,8,9,12,13,14,25,26)。文献(6)参照。

3. 類似する研究

過去に類似する目的の研究がいくつか報告されている。

船舶間で見張り情報を共有することで船舶運航の安全性を高める試みが文献(3),(4)に示されている。文献(3),(4)では通信手段として IEEE802.11J を用いる前提で海上浮遊物や海洋生物等の情報を接近した船舶間で共有するシステムの可能性を検討している。

また、文献(5)では著者らが構築したユビキタスナビ(3G 回線に基づく小型船舶の航行情報を共有するためのネットワーク)を用いて、ユビキタスナビ搭載小型船舶(漁船)の情報をAIS の情報とともにユビキタスナビ搭載船舶に配信するシステムを作成し、有効性を示している。

これらの IEEE802.11J や 3G 回線を用いる方法に対する、AIS バイナリメッセージを用いる方法の利点は、(a)既存の安価な世界的に成立しているインフラを活用できること、(b)陸から離れた遠距離での情報共有が可能であることが挙げられる。欠点としては通信速度・容量が限られている点が挙げられる。この欠点は将来のAIS の拡張に期待することもできるが、基本的に見張りに必要な情報を厳選して送信することで回避できるものと考える。

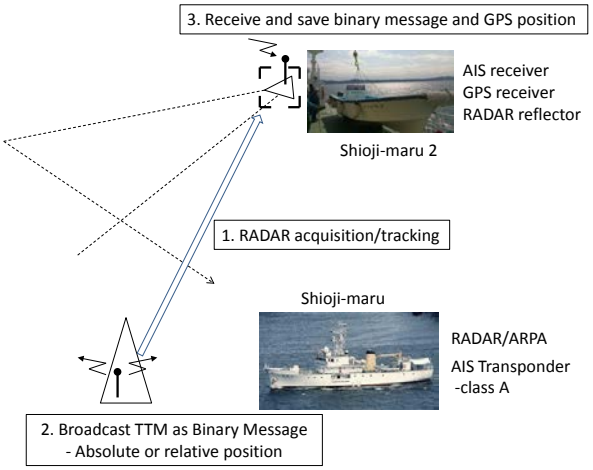


Fig.1 Experimental setup.

4. 実証試験の準備

本研究では見張り情報共有実験として、実際にクラス A AIS トランスポンダを備えた船舶を見張り局として、この見張り局から ARPA で捕捉した小型船舶の位置情報を AIS バイナリメッセージで放送し、AIS 受信機を備えた小型船舶でこれを受信し、その情報の精度について調べた。

Fig.1 に実験の概略図を示す。

4.1 船舶・海域の設定

見張り局としては東京海洋大学の練習船・汐路丸、見張り対象としては搭載艇・汐路丸 2 号を用いた。汐路丸 2 号は AIS・GPS 受信機とレーダーリフレクタを搭載し、汐路丸の前方 1 マイル以内を速度 7kts で走行した。汐路丸は船首方位を維持したまま静止し、汐路丸 2 号を ARPA で捕捉しその位置・速度を 4.3 節に説明する方法でバイナリメッセージとして送信した。送信したバイナリメッセージはその他の AIS メッセージ及び GPS データとともに汐路丸 2 号に搭載したコンピュータに保存した。これによって、GPS データによって得られる汐路丸 2 号の実際の航跡とバイナリメッセージによって得られる汐路丸から送られてきた汐路丸 2 号の航跡を比較することができる。

実験は館山湾にて 2013 年 10 月 17 日、2014 年 1 月 21 日、3 月 6 日に実施したが、2013 年 10 月 17 日、及び、2014 年 3 月 6 日の実験ではGPSデータを取得できなかった [2]ため、実質 2014 年 1 月 21 日しか成功していない。今回は 2014 年 1 月 21 日のデータについて報告する。

[2] どの日も 2 種類の GPS 受信機を用意して臨んだが、館山湾ではしばしば GPS が受信できない。原因は不明である。

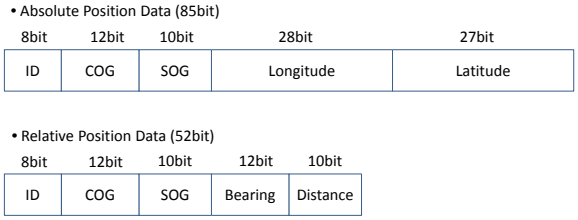


Fig.2 Bit layout for absolute and relative position data.

4.2 小型船舶の捕捉方法

ARPA で船舶を捕捉するには、自動、あるいは、手動の 2 通りの方法が考えられる。手動捕捉は ARPA 上でユーザーがカーソルを目標のレーダーエコーに重ねて捕捉ボタンを押すことで行う。自動捕捉では ARPA が船舶のエコーであると判断したものを自動的に捕捉する。自動捕捉は精度が低いので、今回は手動捕捉を行った。

船舶の捕捉方法としては ARPA 以外にも、例えば、コンピュータビジョンを用いる方法や [(5)]、ARPA とコンピュータビジョンを複合的に用いる方法が考えられる。これは現在開発中である。

4.3 バイナリメッセージの送信

バイナリメッセージは Message 8 で送信する。Message 6 はヘッダー情報が大きく、また、新たに定義されている Message 25、26 は現状の汐路丸搭載の AIS トランスポンダからは発信できなかった。これら、バイナリメッセージのメッセージフォーマットについては文献(6)を参照されたい。

ARPA からは捕捉した船舶の本船からの方位と距離が TTM(Tracked Target Message)センテンスで得られる。これを AIS トランスポンダに BBM(Binary Broadcast Message)センテンスとして与えることで Message 8 が送信される。

送信方法としては二種類を試した。ひとつは絶対座標送信、もうひとつは相対座標送信である。Fig.2 に絶対座標送信・相対座標送信データのビットレイアウトを示す。

絶対座標の送信では実験用 PC が TTM センテンスを得た時点での本船の GPS 位置を基準に計算した緯度経度、TTM から得られる SOG(Speed over Ground)、COG(Course over Ground)、TTM の識別番号を送信する。データのビットレイアウトは Message 1(動的情報)の方式に従って、緯度 27bit、経度 28bit、COG 12bit、SOG 10bit とした。加えて識別番号を 8bit

としたので、合計 85bit 送信することになる。

相対座標の送信では TTM センテンスの内容から識別番号、方位、距離、SOG、COG をそれぞれ 8bit、12bit、10bit、10bit、12bit で送信する。したがって、合計 52bit 送信することになる。

相対座標送信の場合、受信側では見張り局の MMSI(Maritime Mobile Service Identity)番号に対応する Message 1 を使って絶対座標を計算する。

絶対座標送信はデータ量が多いが、TTM を得て絶対座標を計算するまでの時間差が少ないため、見張り局の運動による誤差が生じにくいと考えられる。一方、相対座標送信ではバイナリメッセージや Message1 の送受信タイミングによって TTM を得た時刻と絶対座標の計算に用いる Message 1 の送信された時刻に大きい場合には約 14 秒(バイナリメッセージ送信遅延 4 秒+Message 1 送信間隔 10 秒)の差が生じる。

一方で、バイナリメッセージは、ビットスタッフィング次第ではあるが、基本的に 1 スロットで 136bit の長さしか送ることができない[6]。諸々のヘッダー情報を除くと 136bit のうちデータを送信することができるのは 79bit である。したがって、相対座標送信は 1 スロットで送信可能であるが、絶対座標送信は 2 スロットでの送信になる。5.1 節で示すが、使用スロット数は絶対座標送信と相対座標送信の送信可能頻度に大きな差を生じる。

5. 実験結果

5.1 バイナリメッセージの送信状況

汐路丸 2 号を汐路丸のレーダーで捕捉して以降、バイナリメッセージは 5 秒間に 1 回、チャンネル A・B[3]の両方に送信するようにし、絶対座標送信の実験は 14 時 6 分 48 秒から 14 時 23 分 38 秒(1010 秒)の間で、相対座標送信の実験は 14 時 24 分 19 秒から 14 時 41 分 13 秒(1014 秒)まで行った。その結果、絶対座標送信では 170 回、相対座標送信では 330 回のデータを送信することに成功した。相対座標送信の方の通信成功回数が倍近く多いのは、主に使用スロット数が半分と少ないためであると考えられる。

一方、5 秒に一度送信が確実にできていれば、1010 秒の間に 404 回(チャンネル A・B 合わせて)の送信が

[3] 通信の確実性のために 2 チャンネルに多重に送っている。チャンネル A は 161.975Mhz (87B)、チャンネル B は 162.025Mhz (88B)である。

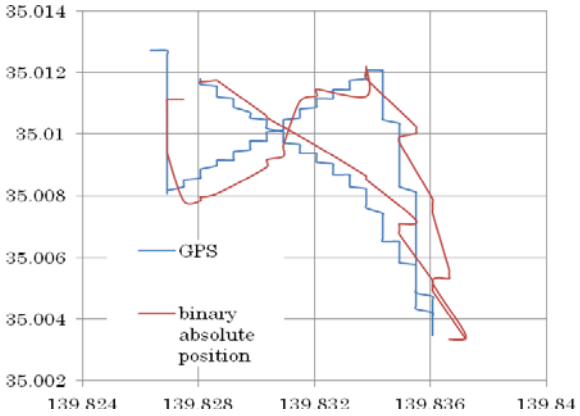


Fig.3 Comparison between transmitted absolute position and GPS position.

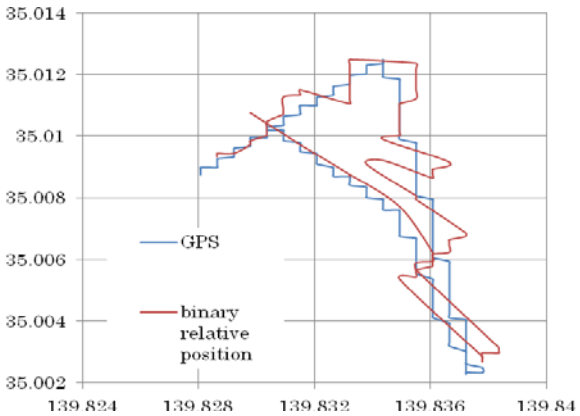


Fig.4 Comparison between transmitted relative position and GPS position.

可能であるはずであるので、絶対座標送信の成功率は 42.1%、相対座標送信の成功率は 81.7%である。

相対座標送信は絶対座標計算までに時間差があるため、位置決定誤差が大きくなる可能性があるが、一方で、送信頻度を高めることができるという点からは、位置決定誤差を小さくできる可能性がある。

5.2 GPS データとの比較

Fig.3 および 4 に絶対座標送信と相対座標送信の航跡の GPS による航跡の比較を示す。横軸は経度、縦軸は緯度を示している。補完やスムージングは行っていない。汐路丸 2 号の走行コースが若干異なるので正確な比較をすることはできないが、バイナリメッセージ受信時の GPS 位置に対する二乗差の平均の平方根は絶対座標送信では 75.2m、相対座標送信では 92.5m であった。

バイナリメッセージの送信可能頻度における比較では相対座標送信の方が有利であるが、GPS 位置

との平均二乗差における比較では絶対座標送信の方が有利となっている。

今回、汐路丸は静止した状態であったのでバイナリメッセージ送信時点での見張り局の位置・船首方位と、見張り局から発信された最近のAIS Message 1で得られた位置・船首方位の差は少ないと考えられるが、それでも相対座標送信によって誤差は明らかに増えている。

誤差の原因は多数考えられるが、今回のデータだけでは判然としない。特に気象・海象等がレーダーの映像に及ぼす影響は大きく、見張り局の動揺や風によるスキャナの振動によって、ARPAでの計測距離がしばしば大きく変動する。そのような影響を分離するためには、より洗練された実験手順を確立し、多くのデータを収集、解析する必要がある。

その上で、双方の位置決定精度を比較するためには、さらにいくつかのステップを経る必要がある。

まず、今回は見張り局を静止させて実験を行ったが、これを動かす必要がある。また、位置の決定にはカルマンフィルタ等の手法を用いて適切に平滑化する必要がある。

また、バイナリメッセージの送信にはRATDMA(Random Time Division Multiple Access)の仕様上最大4秒(150スロット)の遅延が想定される。位置推定精度をより高めるためにはUTC秒を送信データに含め、計算に用いる必要があると考えられる。

6. まとめ

ARPAで捕捉した船舶をAISバイナリメッセージで共有する実験を行った。バイナリメッセージの送信方法としては相対座標送信・絶対座標送信の二通りを試みた。相対座標送信は送信データが少なく、1スロットで送信可能であるため、送信頻度を高めることができるが、一方で、GPS データとの平均二乗差は絶対座標送信の方が少ない結果となった。

双方の比較に関しては、今後、誤差の原因の特定を含めて詳細に行っていく予定である。

見張り局自体のAIS非搭載船舶の捕捉・追尾・位置決定能力を強化する必要がある。絶対位置送信における平均75mの誤差の主要因はARPAの位置決定誤差であると考えられる。より高度なレーダーおよびレーダー信号処理技術、コンピュータビジョン等を併用することを計画している。

また、今回は、見張り局の船舶1隻と見張り対象となるAIS非搭載船舶1艇という最も単純な構成で実験を行ったが、現在、複数の見張り局、複数の見張り対象を扱う場合の通信プロトコルを検討しており、今後実験によって評価を行いたい。

謝辞

本研究は東京海洋大学練習船・汐路丸およびその乗組員の皆さまの協力によって成立しております。

本研究はJSPS科研費25820419の助成を受けたものです。

(1) ITU：Resolution 360 (WRC-12), 2012.
(2) 丹羽康之・福戸淳司・宮本佳則・稲岡孝:AIS情報を用いた小型船用見張り支援システム, 日本航海学会論文集, Vol.125, pp.35-43, 2012.
(3) 丹羽康之・本木久也・西崎ちひろ・瀬田剛広：指向性アンテナを用いた船間無線LAN通信実験-II 行会い状態における実海域実験, 日本航海学会論文集, Vol.127, pp.149-155, 2013.
(4) 丹羽康之・本木久也・西崎ちひろ・瀬田剛広：指向性アンテナを用いた船間無線LAN通信実験, 日本航海学会論文集, Vol.126, pp.283-288, 2012.
(5) 松本洋平:HOG特徴量を用いた船舶画像認識, 日本航海学会論文集, Vol.129, pp.105-112, 2013.
(6) ITU：Recmmendation M.1371-4, 2010.

浮体式 OWC 型波力発電装置の性能推定に対する MPS 法の適用性に関する研究

学生会員○笹原　裕太郎（東京海洋大学大学院）　正会員　増田　光弘（東京海洋大学大学院）
正会員　南　清和　（東京海洋大学大学院）　非会員　増田　光一　（日本大学理工学部）

要旨

港湾区域のような大規模インフラでは物流システムの集中に起因する多量の温室効果ガスの効率的な削減や、災害時等に際してはその機能の保持および電力供給の自己完結性の向上といった観点から海洋再生可能エネルギーの効率的な利用が進められている。中でも波浪エネルギーを利用した浮体式波力発電装置は装置後方の静穏海域の創出が可能であり、港湾区域への導入に適していると考えられる。本研究では、浮体式波力発電装置の実用化に際して重要な検討項目である台風などの異常気象海象化における装置の安全性を評価する手法の確立を目的とし、非線形性現象および流体−構造体連成解析に優れる MPS 法を用いた解析手法の提案を行う。本報では、基礎的な検討として固定式波力発電装置の性能推定に対して MPS 法を適用させ、その妥当性について計算結果および実験結果との比較検討を行った。

キーワード：海洋工学、波力発電、OWC 型、MPS 法、一次変換効率

1. 緒言

大規模インフラ、特に港湾地域においては、貨物および旅客用船舶、さらにそれに伴う海および陸上の物流システムが集中するため温室効果ガスの排出量が多く効率的な削減が求められている。また、災害時における必要な機能の保持および電力需給逼迫時の自己完結性の強化の観点から、海洋再生可能エネルギー利用の推進が進められている。

本研究では、港湾地域における海洋再生可能エネルギー利用として、波浪エネルギーを利用する浮体式振動水柱型(Oscillating Water Column: OWC型)波力発電に着目した。波力発電は太陽光発電や風力発電に比べて発電に係る占有面積が相対的に小さく、既設構造物や船舶航行への安全性への影響が少ないと考えられる。また、浮体式波力発電装置はその性質上、波浪エネルギーを吸収するため装置後方に静穏海域を創出する浮体式消波堤としての機能を有することから、港湾設備の一部として十分に活用できると考えられる。さらに、OWC型はその構造上台風などの異常海象下における安全性が高いとされており我が国では研究が進められてきた[(1)]。しかしながら、異常海象下における大波浪やそれに伴う海水打ち込みおよび波浪衝撃力、さらに係留系の複雑な挙動といった非線形性の強い現象に対する浮体式波力発電システム全体の安全性を評価する手法はこれまで確立していない。

そこで本研究では、越塚ら[(2)]が開発した非線形性の強い現象の再現や流体-構造物連成解析に対する適用性の高い計算手法であるMPS(Moving Particle Simulation)法に着目した。しかしながら、OWC型波力発電装置の性能推定に対してMPS法を適用させた例はこれまで存在しないため、その適用性については基礎的な検討を行う必要がある。

本研究では、固定式 OWC 型波力発電装置の性能推定に対して MPS 法による数値シミュレーションを行う。OWC 型波力発電装置の空気室内水面変動および変動圧力、さらに一次変換効率について計算結果および実験結果との比較により、本問題に対する MPS 法の適用性についての検討を行う。

3. OWC 型波力発電装置の性能推定

OWC型固定式波力発電装置(以下、OWCモデル)の性能推定に対するMSP法による数値シミュレーションを行い、既存の実験[(3)]との比較により本手法の適用性に関する検討を行った。解析対象は、大きさの異なる 3 種類のOWCモデルの空気室内における水面変動および変動圧力、および波エネルギーの吸収効率とした。Fig. 1 およびTable 1 に各OWCモデルの諸元を示す。また、本計算における二次元数値水槽をFig. 2 に示す。粒子間距離を 0.01[m]とし、総粒子数は 169,219 個、再現時間を 15.0[sec]とした。入射波条件は波高を 0.03[m]として、周期を 0.8、0.9、

1.0、1.2、1.4[sec]と変化させた。なお、本研究では空気室内の自由表面と空気間の相互作用は無視できる大きさであると仮定し、空気室内圧力は水面変動による空気室内体積変動に対して線形的に変化するものとした。

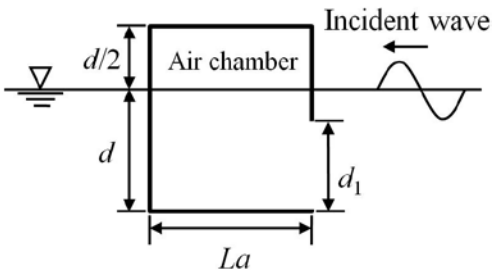


Fig. 1　Numerical fixed OWC-type model.

Table 1 Dimensions of OWC models.

Type	L_a [m]	d_1 [m]	d [m]
A	0.30	0.22	0.30
B	0.22	0.13	0.30
C	0.40	0.10	0.30

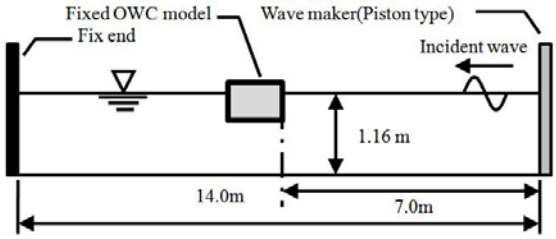


Fig. 2　Numerical water tank for fixed OWC-type

4. 主要な結論

計算結果の代表例としてOWCモデルType Aについての実験結果との比較を行った結果を示す。Fig. 3に波長λと浮体全長L_aの比に対する空気室内部水面変動ηと入射波振幅aとの比を示す。Fig. 3 より改良MPS法による計算結果は実験結果とおおむね一致していることがわかる。λ/L_aが大きい場合に実験値との誤差がみられるが、これはType Aは空気室開口部が大きく流入量が多いため空気室内初期体積に対する空気室内の水面変動が大きくなり空気室内空気との相互作用の影響が現れたためであると考えられる。また、Fig. 4 にλ/L_aに対する空気室内の圧力の一次振幅の無次元値を示す。Fig. 4 より計算結果および実験結果は全入射波周期にわたり良好な一致を示していることがわかる。λ/L_aが大きいときは、水面変動は大きくなるが単位時間当たりの体積変動は小さくなるため圧力値の上昇が抑えられたと考えられる。そして、Fig. 5 にλ/L_aに対する波エネルギー吸収効率を示す。Fig. 5 より計算結果は実験結果を良好に再現しており、OWC型固定式波力発電装置の性能評価に対してMPS法を用いることの妥当性を得ることができたといえる。λ/L_aが大きい場合に生じる誤差は空気室内の空気を適切に再現することで小さくできると考えられる。

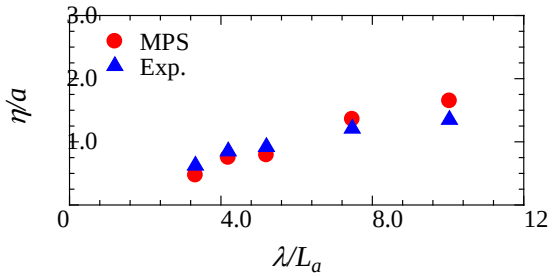


Fig.3　Amplitude of wave level in air chamber (Type A)

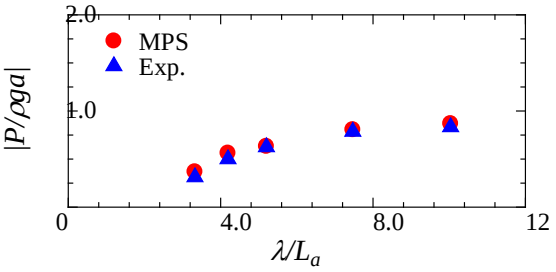


Fig.4　Pressure in air chamber (Type A)

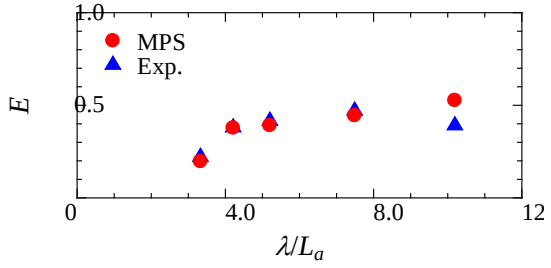


Fig.5　Efficiency primary conversion (Type A)

(1)　大澤弘敬・宮崎剛・鷲尾幸久・堀田平・宮崎武昇：波浪エネルギー利用技術の研究開発　―沖合浮体式波力装置マイティホエールの開発―, 海洋科学技術センター, 2004.

(2)　Seiichi KOSHIZUKA, Atushi NODA and Yoshiaki Oka: Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method, Int. J. Numer. Mech. Fluids, Vol.26, pp.751-769, 1998.

Development of Efficiency Measurement for Container Handling Equipment -Application for Hybrid Straddle Carrier-

Student Member ○ Putu Hangga (Graduate School of Engineering, Kyushu University)
Member Takeshi Shinoda（Kyushu University）
Shozo Takahashi（UniCarriers Corporation）
Kazuhiro Hiyoshi（Hakata Port Terminal Co.,Ltd）

Keywords: Container handling equipment, Terminal operation, Efficiency measurement, Hybrid straddle carrier

1. Introduction

Since Kyoto Protocol comes into force in 2005, global warming prevention is strongly desired in all industrial sectors in Japan, including port industries. Kashii Park Port Container Terminal (KPPCT) in Fukuoka city, Japan has employed hybrid (diesel-electric) model of straddle carrier (HSC) to reduce GHG emission. However, it is difficult to estimate the amount of energy saving and gaining through conventional measurements.

This study attempted to establish an efficiency measurement method considering effect of various type of HSC operation in container terminal

2. Analytical method for efficiency measurement

Extraction of information from HSC operation is difficult because of random motion according to given job order. To create an objective analysis, HSC movement is categorized under operation work code from modal transfer and container transport point of view as denoted in Table 1. Each operation contains vertical and horizontal motions such as straight traveling, cornering, hoisting, lowering and container adjustment that can be analyzed separately.

Operational performance information is extracted by voltage logging systems installed on sequencer in engine control room and driver cabin of HSC. Outputs are in the form of waveform of performance variable, notably fuel consumption and battery state of charge. A numerical formulation was defined to convert the waveform and obtain real value during a specific motion.

Video recorders were used to help waveform examination in defining ambiguous waveform. In addition, GPS devices were used to measure HSC position, velocity and traveled distance.

3. Energy analysis result

Several relations between measured variables were gained from energy analysis, particularly during traveling phase, hoisting and lowering motion. For example, Fig. 1 shows that battery rechargeable level is sharply increases in proportion to speed and time during lowering motions. Work cycle analysis pointed out that, traveling-cornering motions consume 71% from total working time and 29% from hoisting-lowering- adjustment motions.

4. Conclusion

Combination of voltage logging system, GPS measurement and video recording were able to indicate energy gain and loss appropriately. Energy analysis has shown the relation between motions and operational performances of HSC, which is valuable for improvement of driving behavior and energy saving in container handling operation.

Table 1 Operation work code of HSC

Code	Denomination	Type of Operation
1	Delivery	Deliver container from CY to OC
2	Receipt	Receive container from OC and stack it in CY
3	Export	Deliver container from CY to QC
4	Import	Receive container from QC and stack it in CY
5	Shifting	Stack and unstack of a container in CY (including rehandling, shift-in, shift-out)

Remark: CY: Container yard, QC : Quay crane, OC: Chassis from outside

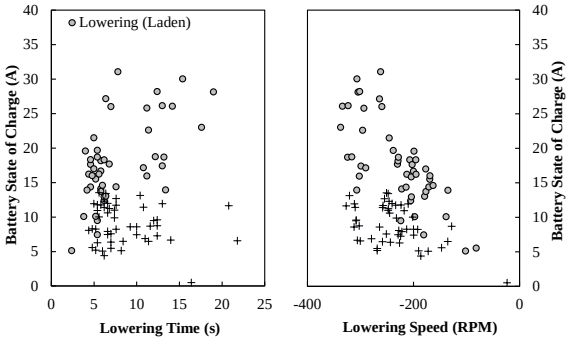


Fig. 1 Battery charge performance under various hoisting-lowering speed and time

OWC 波力発電ブイのエネルギー吸収性能に関する基礎的研究

正会員　増田　光弘（東京海洋大学）　学生会員○茨木　信　（東京海洋大学）
正会員　南　清和　（東京海洋大学）　学生会員　笹原　裕太郎（東京海洋大学）

要旨

本研究では自律的に発電・運用が可能な津波観測ブイの設置に向けて、無指向性の OWC 波力発電装置を提案し、水槽実験によってその適用性および波エネルギー吸収性能にについて検討を行った。本実験では、底面開放型と側面開放型の 2 種類の OWC ブイ模型について検討を行うことにより、OWC 波力発電ブイのエネルギー吸収性能向上の可能性についても検討を行った。本研究により、OWC ブイの基礎的なエネルギー吸収性能を示すことができたとともに、エネルギー吸収性能向上の可能性を示すことができた。

キーワード：海洋工学、津波観測ブイ、OWC 型波力発電装置、1 次変換効率

1. 緒言

南海トラフ沿いで発生するとされる巨大地震に備えて、津波観測ブイの設置が検討されている。その際、課題となるのが津波観測ブイへの電力の供給方法である。沖合に設置される津波観測ブイの場合、自律的に発電・運用できることが好ましい。そこで本研究では、無指向性の振動水柱型(OWC)波力発電ブイを提案し、水槽実験を行うことによって、その適用性および波エネルギー吸収性能を検討した。

2. 実験概要

使用する模型は Type 1（底面開放型)、Type 2（側面開放型）の 2 種類を用いた。Type 2 の模型の概要を Fig. 1、Table 1 に示す。Type 1 模型は、Fig. 1m の OWC 部の底板がない模型である。Type 1、Type 2 ともに、浮体模型の喫水は 0.35m である。空気室のノズル径は、15.7mm、11.1mm の 2 種類とした。模型の拘束方法は、トート係留方式と完全固定状態の 2 種類とした。計測項目は、浮体前方の入射波高と浮体後方の透過波、各空気室内部波高、空気室内部圧力、係留索張力とした。それらの計測機器を Fig. 2 のように設置し、空気室内部圧力と空気室内部波高は、Fig. 3 に示すように 4 カ所の空気室に番号を付けて計測を行った。また、係留実験では模型の運動を 3 次元光学式運動計測装置により計測した。入射波条件は、波高 0.05m、波周期 0.6～2.6s の規則波とし、0.2s 刻みで計測した。また、固定実験では係留実験の際、模型が時計回り 0 度～7 度の間でヨーイング軸周りに回転運動をしていたため、固定実験では 0 度と 7 度の 2 ケースについて検討を行った。

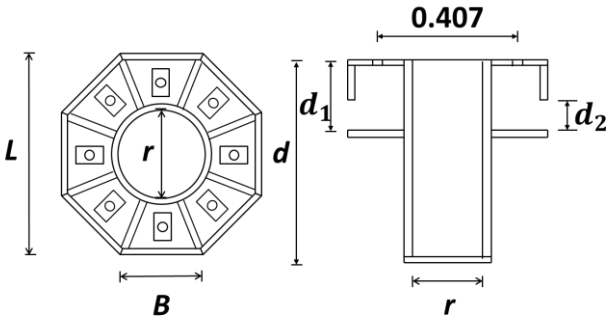


Fig. 1　Experimental model of Type 2

Table 1　Principal Particulars of experimental model

Type	L(m)	B(m)	r(m)	d(m)	d_1(m)	d_2(m)	T_{OWC}(s)
1	0.543	0.225	0.24	0.45	0.214	0.12	1.148
2	0.543	0.225	0.24	0.45	0.214	0.058	0.872

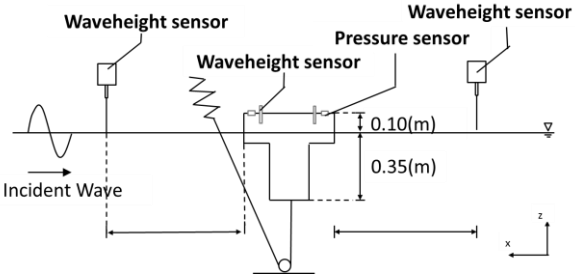


Fig. 2　Experimental setup system

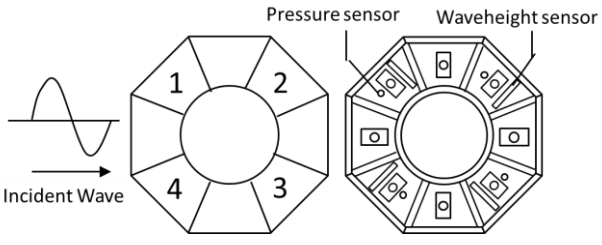


Fig. 3　Number of air chambers

3. 結果および考察

係留実験のノズル径 15.7mm の Type 2 の各空気室の 1 次変換効率を Fig. 4 に示し、固定実験(設置角度 7 度)のノズル径 11.1mm の Type 2 の各空気室の 1 次変換効率を Fig. 5 に示す。係留実験の浮体全体の 1 次変換効率を Fig. 6 に示す。各グラフの横軸は、波長 λ を OWC 長さ L で無次元化したものであり、縦軸は 1 次変換効率である。

Fig. 4 から、波上側(1、4)と波下側(2、3)を比較すると、波上側の空気室の方が、1 次変換効率が高くなった。これは、入射波が空気室内を伝搬していく過程で分散・減衰していくためだと考えられる。このことから、空気室内部を分割すると波上側と波下側では発電効率に大きな差が出ることが確認できた。Fig. 5 からノズル径 11.1mm では模型角度を変えた時、空気室 1 の発電効率は 117%向上し、空気室 4 は 73%減衰した。しかし、ノズル径 15.7mm では角度を変えても、空気室 1 と 4 で発電効率はほとんど変化がなかった。また、浮体全体の 1 次変換効率で比較すると角度を変えても変わらないことが確認できた。このことから、角度の変化は浮体全体の発電効率にはあまり影響せず、発電効率にはノズル径の大きさの違いの影響の方が大きいことが確認できた。Fig. 6 より、ノズル径を大きくすると、125%程度発電効率が向上することが確認できた。さらに、Type 1 と Type 2 の浮体全体の 1 次変換効率を比較すると、Type 2 の方が 250%程度高くなることが確認できた。このことから、既存の研究[1), 2)]でも指摘されているように、OWC 波力発電装置は底板を設けることにより、発電効率を高めることができることが確認できた。また、Type 1 と Type 2 ともに発電効率は λ/L=2 で最大となることが確認できた。この時、係留状態では固定状態に比べて 75%程度発電効率が低下し、周期帯も短くなることが確認できた。これは、本実験で用いた波周期が模型の全長に対して長く、模型が波に乗ってしまったことが原因だと考えられる。

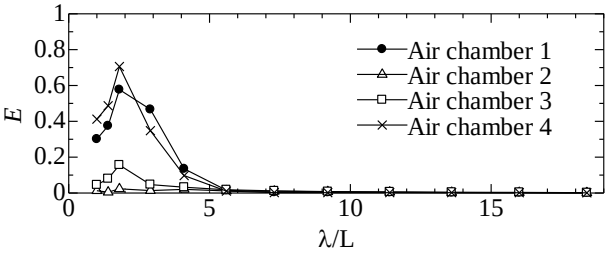


Fig. 4 Primary conversion efficiency (Type 2, N15.7mm)

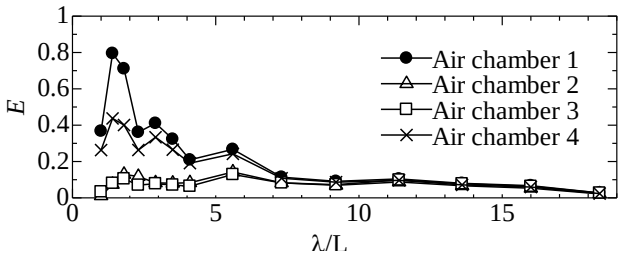


Fig. 5 Primary conversion efficiency (Type 2, N11.1mm, 7 degrees)

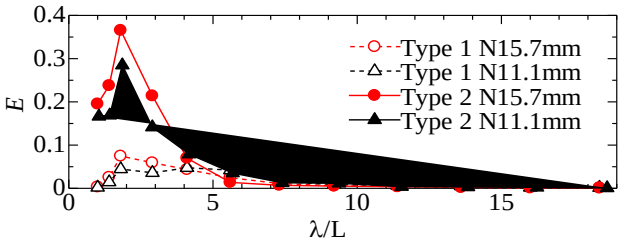


Fig. 6 Primary conversion efficiency of whole air chamber

4. 結言

本研究により、津波観測のための OWC 波力発電ブイについて以下のような知見を得た。

(1) Type 1 と Type 2 ともに発電効率は λ/L=2 で最大となることが確認できた。また、波上側(1、4)と波下側(2、3)の発電効率を比較すると、波上側の空気室の方が高いことが確認できた。

(2) 底板を設けることにより、発電効率は向上し、ノズル径が大きい方が発電効率は向上することが確認できた。

今後の課題として、実際に要求される電力量やよりエネルギー吸収効率を向上させる方法について検討する必要がある。

5. 謝辞

本研究は独立行政法人海洋研究開発機構との共同研究によって行われたことを付記いたします。

6. 参考文献

(1) 増田光一、居駒和樹、富沢裕也；多重振動型波浪発電装置の波エネルギー吸収性能に関する研究、修士論文、pp. 1-74、2008.

(2) 居駒和樹、大森光、増田光一、大澤弘敬、田口裕之；プロジェクティングウォールが OWC 型波エネルギー変換装置の 1 次変換性能に与える効果、日本船舶海洋工学講習会論文集、第 16 号、pp. 441-444、2013.

長江口深水航路を用いた鉄鉱石輸入における二酸化炭素排出量の削減策に関する研究

学生会員○　咸　暁黎（東京海洋大学大学院）　正会員　黒川　久幸（東京海洋大学）

要旨

現在、世界的に地球温暖化が問題となっており、外航海運から排出される 2007 年の温室効果ガスは IMO の推定によれば 8.5 億 t-CO_2で、世界全体の二酸化炭素排出量の約 3%を占めている。このため海運における二酸化炭素排出量の削減が重要となっている。

そこで本研究では、急増する中国の鉄鉱石輸入を対象に船舶の大型化による二酸化炭素排出量の削減効果を検討する。また、中国国内の長江口深水航路等の航行では水深の制約から大型船が満船で就航することはできず、この影響を考慮した検証が必要である。そこで船舶の積載状態による喫水の変化を考慮に入れて、船舶の大型化による二酸化炭素の削減効果の検証を行うこととする。検証の結果、長江口深水航路の水深の制約から 10 万 DWT を超える鉄鉱石輸送船では積載量の低下から二酸化炭素排出量が増加することが分かった。つまり、水深の制約がある場合は過度な大型化は有効な削減策でないと分かった。

キーワード：物流・海運、二酸化炭素排出量、鉄鉱石輸入、長江口深水航路

1. はじめに

現在、世界的に地球温暖化が問題となっており、2011 年における世界全体の二酸化炭素排出量は 313 億t-CO_2となっている。外航海運からの排出量は 2007 年のIMOの推定によれば8.5億t-CO_2となっており、世界全体の約 3%を占め、イギリス、フランスの合計よりも多い。このため海運からの二酸化炭素排出量の削減が重要となっている。

しかし、海上荷動き量は年々増加しており、増加に伴う二酸化炭素排出量の増加が懸念されている。特に、中国の鉄鉱石の輸入量は急増しており、2009 年は約 6 億トンで世界全体の約 65%を占めている。

このため、中国の鉄鉱石輸入における二酸化炭素排出量の現状把握と削減効果の検証が必要となっているが、具体的な二酸化炭素排出量の推計等は行われていない。

そこで本研究では、急増する中国の鉄鉱石輸入を対象に輸入に伴う二酸化炭素排出量を推計するとともに、船舶の大型化による二酸化炭素排出量の削減効果を検証することを目的とする。

なお、船舶の大型化ではブラジルの総合資源開発企業が 40 万 DWT の大型船を大量に発注し、就航船舶の大型化が進みつつある。しかし、中国国内の長江口深水航路等の航行では水深の制約から大型船が満船で就航することはできず、この影響を考慮した検証が必要である。そこで船舶の積載状態による喫水の変化を考慮に入れて、船舶の大型化による二酸化炭素の削減効果の検証を行うこととする。

2. 中国の鉄鉱石輸入の現状

2.1　中国の粗鋼生産量

中国は世界一の粗鋼生産国である。中国における2010年の粗鋼生産量は約6億トンと世界の45%を占めている。この背景には旺盛な国内需要があり、自動車や家電製品の急激な消費がある。また、人口増加による住宅建設の増加も影響している。

2.2　中国の鉄鉱石輸入量

鉄鉱石は粗鋼を生産する原料として使用され、中国国内にも埋蔵されている。しかし、中国に埋蔵されている鉄鉱石は鉄分含有量が 30%程度と低く、大型高炉で必要とされる品質（60%程度）の基準を満たさない。このため高品質の鉄鉱石を求めて、オーストラリアやブラジルといった他の鉄鉱石産出国から鉄鉱石を輸入している。

したがって、粗鋼の生産量の増加とともに、鉄鉱石の輸入量が年々増加している。中国の鉄鉱石輸入量は、2001 年に世界全体の約 18%（約 9000 万トン）を占めていたが、2009 年には約 65%（約 6 億トン）も占めるに至っている。

2.3　長江口深水航路を用いた鉄鉱石輸入

オーストラリアやブラジル等の鉄鉱石産出国から長江沿線エリアの製鉄所までの輸送経路は、大き

く２つに分けることができる。まず、オーストラリア等の鉄鉱石産出国から長江沿線エリアの大水深バースを有する貿易港まで外航船で鉄鉱石を輸送する外航輸送である。そして、貿易港で荷揚げされた鉄鉱石を内航船で製鉄所まで輸送する内航輸送となる。

長江沿線エリアにある宝鋼製鉄所の 2010 年の粗鋼生産量は4450万トンで中国全体の約7%占めており、生産に使用する鉄鉱石は、100%輸入に頼っている。そして、鉄鉱石の輸入先として最も輸入量が多いのは、オーストラリアのポート・ヘッドランド港である。そこで本研究では、オーストラリアのポート・ヘッドランド港から宝鋼製鉄所までの鉄鉱石輸入を対象とする。

具体的には、図１に示すようにポート・ヘッドランド港で鉄鉱石を20－30万DWTの大型の鉄鉱石船に船積みし、この大型船が着岸できる水深25mのバースを１岸壁持っている馬迹山港で荷揚げし、その後、鉄鉱石を内航船によって長江口深水航路を通航し、宝鋼製鉄所のある宝鋼の原料バースまで輸送する経路となる。

なお、外航輸送で使用されている船舶は、船型の異なる鉄鉱石専用船と一般バルク船に分かれるため、ここでは個別に二酸化炭素排出量を算出することとした。

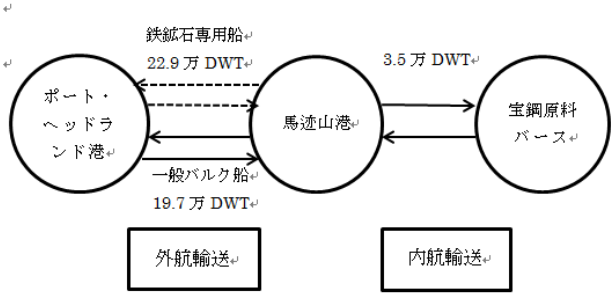


図１　鉄鉱石輸入における輸送経路

2.4 長江口深水航路

長江口深水航路 (5) は長江航路の一部で、長江の河口に位置する。水深は 12.5mで、大型船が満載で通航できない。そのため、長江口深水航路に入航する船舶は入航する前の 24 時間以内に上海海事局に通航申請を出し、船隊を編成されたうえで、先航する船舶と１海里の距離をおいて通航しなければならない。通航できる最大喫水は、下記の式から求められる。

通航可能の喫水＝12.5m＋潮位(m)－余裕水深(m)
*潮位：長興高潮前５時間の鶏骨礁潮汐の潮位
*余裕水深：船舶の満載喫水の 12%

3. 二酸化炭素排出量及び鉄鉱石輸入量の推計

3.1　二酸化炭素排出量の定式化

鉄鉱石輸送の多くは、輸出港からの往路は満船（満載）で、輸入港からの復路は空船となっている。そこで本研究では二酸化炭素排出量をより正確に推計するために、往路と復路の積載率の相違を考慮に入れて次のように推計する。

なお、空船時のバラスト水は、3.5 節に示すように満載積載量の 30%とした。

$$CO_2 = \left((Y_W + Y_{30}) \cdot \frac{DST}{V} \cdot C \right) \cdot \frac{DEM}{W}$$

CO_2：二酸化炭素排出量（kg-CO_2/年）
Y_W:積載量Wの時の燃料消費量（トン/日）
Y_{30}：空船時の燃料消費量（トン/日）
DEM：年間需要量（トン/年）
W：船舶の積載量（トン）
DST：輸出入港間の航海距離（マイル）
V：速力（マイル/日）
C：二酸化炭素排出原単位（kg-CO_2/トン）

3.2　燃料消費量の推計方法

満載時の燃料消費量は参考文献(2)により求められている。また、ヒアリングから空船時の燃料消費量は満載時と比べて約２トン少ないということが分かった。そして、この傾向は船型によって大きな相違がないということであったので、任意の積載状態の時の燃料消費量を次のように推計することとした。

$$Y_W = Y_{full} + \frac{2}{100-30} \cdot \left(\frac{W}{W_{full}} \cdot 100 - 100 \right)$$

Y_W：積載量Wの時の燃料消費量（トン/日）
Y_{full}：満載時の燃料消費量（トン/日）
W：船舶の積載量（トン）
W_{full}：満載時の積載量（トン）

3.3　鉄鉱石輸入量の推計方法

輸出港と輸入港の間における鉄鉱石輸入量のデータは存在しない。そこで本研究では、中国海関と

LMIU の船舶動静データから鉄鉱石輸入量を推計した。中国海関のデータから、各産出国からの鉄鉱石輸入量は分かる。しかし、中国の国内港における各産出国及び各輸出港からの輸入量は不明である。

そこで本研究では、LMIU の船舶動静データ（2010 年）より各国内港への各輸出港からの船腹量を推計し、この船腹量の構成比率を用いて港湾調査から得られた国別の輸入量を按分することとした。ここでいう船腹量とは、寄港船舶の載貨重量トン（DWT）とその輸送船の年間寄港回数を乗じた年間輸送能力を意味する。

以上の方法により、オーストラリアの各輸出港から各輸入港に寄港する船舶の年間船腹量を計算しところ、合計で約 2 億トンとなった。そして、輸入量を船腹量で按分した。今回対象としたポート・ヘッドランド港から馬迹山港への 2010 年における輸入量の推計結果を表 1 に示す。また、宝鋼は馬迹山港の輸入量と同じ量が馬迹山港から運ばれる。

3.4 検証で用いるデータ

3.4.1 二酸化炭素排出原単位

二酸化炭素排出原単位として、参考文献（3）より得られるC重油の二酸化炭素排出原単位 2987.8[kg-CO_2/kl]を用いる。

3.4.2 航海距離

BLM-Shipping 及び参考文献（1）より対象港湾間の航海距離を求めた。結果を表 2 に示す。

3.4.3 平均船型

外航輸送で用いられる船舶の船型を LMIU の船舶動静データ（2010 年）より求めた。馬迹山港に寄港する鉄鉱石専用船と一般バルク船の平均船型（DWT）を表 3 に示す。また、内航輸送については、参考文献（1）より、平均船型を 3.5 万 DWT とした。

3.4.4 船舶の平均速力及び積載率

鉄鉱石の輸送に用いられる船舶の平均速力を参考文献（2）から 14.3 ノットとした。

また、外航輸送における鉄鉱石船の平均積載率を参考文献（4）より次のように定めた。20 万 DWT 程度の鉄鉱石専用船の平均積載率は 90%-95%程度であったので、平均積載率を 92.5%とした。

3.5 バラスト水の設定

空船時のバラスト水の積載量をヒアリング等から満載時の 30%とした。また、これより鉄鉱石を多く積載している場合は､バラスト水を入れないため、本研究ではバラスト水を 0 とした。

表 1　馬迹山港の鉄鉱石輸入量（2010 年）

港	ポート・ヘッドランド港	
馬迹山港	鉄鉱石専用船	一般バルク船
	98.6万トン	359.6万トン
合計	458.2万トン	

表 2　対象とした港湾間の航海距離

港	ポート・ヘッドランド港	宝鋼原料バース
馬迹山港	3127.6マイル	95.0マイル

表 3　馬迹山港に寄港する船舶の平均船型

港	ポート・ヘッドランド港	
馬迹山港	鉄鉱石専用船	一般バルク船
	22.9万DWT	19.7万DWT

4. 現状の二酸化炭素排出量

現状の年間二酸化炭素排出量は 24 万 4500 t-CO_2 である。その内訳は、外航輸送が 22 万 9300 t-CO_2 で、内航輸送が 1 万 5200 t-CO_2である。さらに、外航輸送の内、鉄鉱石専用船は 4 万 8000 t-CO_2で、一般バルク船は 18 万 1300 t-CO_2である。

5. 外航輸送における削減策の検証結果

5.1 検証内容

ポート・ヘッドランド港から馬迹山港への外航輸送を対象に船型の大型化による二酸化炭素排出量の削減効果の検証を行う。現在、外航輸送で用いられている大型の船型は、30 万 DWT と 40 万 DWT の船型が用いられている。そこでこの 2 種類の船型について検証することとする。

5.2 二酸化炭素排出量の削減効果

大型化による二酸化炭素排出量の削減効果を図 2 に示す。図 2 より、大型化した場合、二酸化炭素排出量の削減効果が得られる。外航輸送における二酸化炭素排出量が一番少ないのは 40 万DWTの場合で、現状と比べると、年間約 2 万 7700 t-CO_2の二酸化炭素排出量が削減できる。

6. 内航輸送における削減策の検証結果

6.1 検証内容

馬迹山港から鋼原料バースへの内航輸送を対象に船型の大型化による二酸化炭素排出量の削減効果の検証を行う。検証する船型として、7.4 万 DWT と 17.5 万 DWT の 2 種類とする。また、長江口深水航路の通航においてより多くの鉄鉱石を輸送できるよう

に潮汐を活用した場合としない場合の２つの場合について検証を行う。

6.2　潮汐を活用しない場合の削減効果

長江口深水航路を通航する際に潮汐を活用しない場合の結果を図３に示す。図３より、大型化した場合、二酸化炭素排出量の削減効果が得られる。二酸化炭素排出量が一番少ないのは 7.4 万DWTの場合で、現状と比べると、年間約 2800 t-CO_2の二酸化炭素排出量が削減できる。

6.3　潮汐を活用した場合の削減効果

満潮時は潮位が高くなり、長江口深水航路の水深が深くなるため、より多くの鉄鉱石を積載して通航することが出来る。そこで本研究では 2013 年２月において長興高潮前５時間鶏骨礁の満潮位が最も低い潮位 2.07ｍで、通航できる最大水深 14.57ｍの場合について検証した結果を図４に示す。図４より、大型化した場合、二酸化炭素排出量の削減効果が得られる。二酸化炭素排出量が一番少ないのは 7.4 万DWTの場合で、現状と比べると、年間約 5200 t-CO_2の二酸化炭素排出量が削減できる。潮汐を活用しない場合より削減効果が大きいことが分かった。

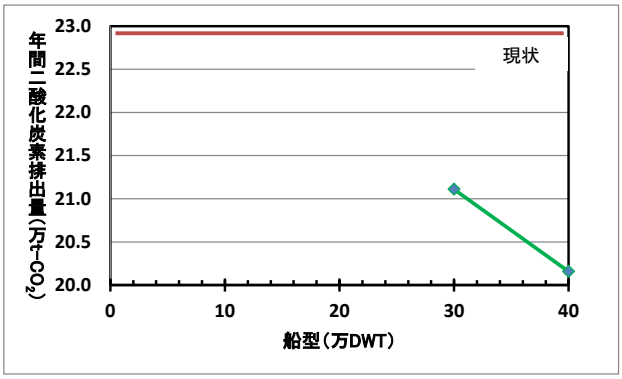


図 2　大型化による二酸化炭素排出量の削減効果（外航輸送）

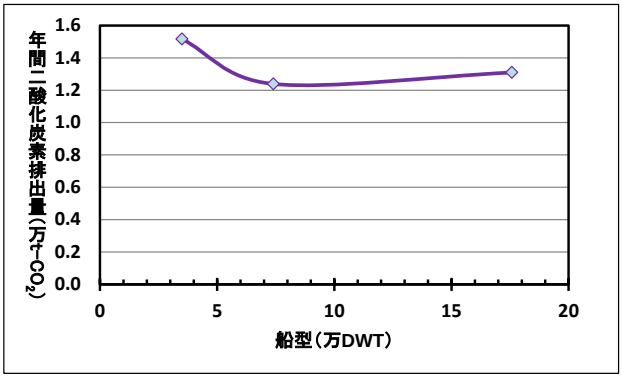


図 3　潮汐を活用しない場合の大型化による二酸化炭素排出量の削減効果（内航輸送）

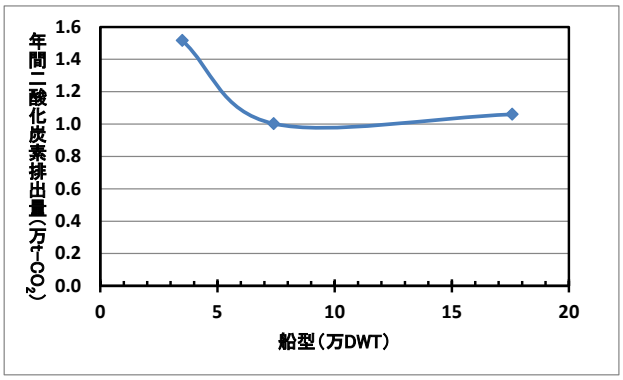


図 4　潮汐を活用した場合の大型化による二酸化炭素排出量の削減効果（内航輸送）

7.　おわりに

本研究では、輸出港から製鉄所までの現状の二酸化炭素排出量を算出し、鉄鉱石輸送船の大型化による二酸化炭素排出量の削減策を検証した。

検証の結果、外航輸送における削減効果が一番大きいのは 40 万DWTの鉄鉱石船で年間合計 2 万 7700 t-CO_2の二酸化炭素排出量が削減できる。また、内航輸送における削減効果が一番大きいのは潮汐を活用して 7.4 万DWTの鉄鉱石船で輸送を行った場合で年間合計 5200 t-CO_2の二酸化炭素排出量が削減できる。内航輸送では長江口深水航路の水深制約から 10 万DWTを超える鉄鉱石船では積載量の低下から削減効果を得られない。ことからさらに二酸化炭素排出量を削減するためには、長江口深水航路の浚渫を行う必要がある。

参考文献

(1) 吴永： 马迹山到宝鋼二程鉄鉱石輸送船舶の船型経済検証， 上海海事大学修士卒業論文，2006.

(2) 赤倉康寛，瀬間基広：国総研資料 No.560，我が国へのドライバルク貨物輸送の効率化に向けた一考察，2009.12

(3) 国土交通省：環境負荷の小さい物流体系の構築を目指す実証実験，CO_2排出削減量の計算要領，2004.9

(4) 鈴木理沙，黒川久幸，鶴田三郎：我が国のドライバルク港湾における政策効果の検証に関する研究，日本航海学会論文集 No127，pp.181-188，2012.9

(5) 長江口深水航道（12.5m）試通航期間　通航安全管理方法，2010.05.06

Establishment of Evaluation and Decision Making Model for Cargo Transportation System in Indonesia

Student Member ○ Sumanta BUANA (Kyushu University)
Member Takeshi SHINODA (Kyushu University)

Abstract
It is difficult to make decision from various alternatives, each of which has several factors with many aspects of relationship. Difficulty arises when fuzziness among the identified aspects exists. Such circumstances occur in designing an engineering system, particularly at conceptual design stage. Thus, in order to be able to cope with the aspects that are combined with experience and knowledge of engineer and expert, we try to establish a method for making decision based on multi-criteria analysis. As an example, an evaluation model for inter-city cargo transportation in Indonesia is developed.
Keywords: Evaluation model, Multi-criteria analysis, Inter-city cargo transportation

1. Introduction

Transporting cargo between large cities in Indonesia has been a costly activity because it is merely used one mode of track transportation. Road becomes highly congested which lengthens transportation time and increase transportation cost. A new type of transportation system needs to be developed and applied. In fact, there are several possible alternatives available to solve this problem. However, each alternative has various aspects containing element of fuzziness.

The aim of this study is to establish an evaluation and decision making model for transportation system in Indonesia using the analytical evaluation methodology based on a multi-criteria analysis method. As a practical example, we apply the evaluation model to inter-city cargo transportation between Surabaya and Jakarta.

2. Evaluation model for inter-city cargo transportation in Indonesia

The method is established based on analytical process of evaluation and decision making for uncertainty problems. This process consists of three stages, that is, (i) structural evaluation model, (ii) grading analysis, and (iii) evaluation-decision model. In the first stage, it is necessary to collect as many important factors and necessary items as possible to be used for constructing model. The model construction consists of three parts, that is, (i) hierarchy analysis model, (ii) items under independent evaluation, and (iii) weighing values for items under evaluation. The second stage is to define grading estimation for objectives about items. This is carried out to estimate the objectives using sensory scale such as “good” and “bad”. The last stage is to determine degree of advantage between the alternatives under evaluation using Concordance Index and Concordance Dominance Index.

3. An example of practical application

The method is applied to evaluate and determine cargo transportation system between Surabaya and Jakarta. Of the three major concerns related to transportation problems, that is, operational aspects, social and environmental aspects, we only use the first aspect because it is the most dominant factor. This aspect has seven items such as (1) transportation time, (2) reliability, (3) flexibility, (4) punctuality, (5) capacity/payload, (6) costs, and (7) infrastructure. In this study, we evaluate seven alternatives which are the possible alternative of cargo transportation system: (A) truck, (B) truck and railway, (C) truck and airplane, (D) truck and SPCB that is self propelled container barge, (E) truck and container vessel, (F) truck and ro-ro vessel type A that is conventional type, and (G) truck and ro-ro vessel type B that transports chassis only.

Table 1 shows the goodness gradation for alternatives about items on operational aspects, and Table 2 shows results of concordance dominance indices based on the evaluation of operational aspects. Here, in these figures, the symbol (A) to (G) show transportation alternatives and the symbol (1) to (7) show evaluation items as previously explained.

The alternative G, F, and D, in terms of utilization of ship’s merit, have the highest score respectively. These alternatives are more appropriate than land transportation system due to several advantages in marine transportation systems. The result shows that combinations of truck with several means of transportation such as SPCB, ro-ro A and ro-ro B are selected as the most appropriate transportation system. The most appropriate selection would be a combination of truck with ro-ro vessel type B.

Table 1 Goodness gradation for alternatives about items on operational aspects

Evaluation Items		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Weight of Items		0.184	0.137	0.102	0.124	0.151	0.215	0.087
Transportation System	(A)	F	F	E	VB	VB	F	F
	(B)	G	F	VB	G	F	G	F
	(C)	E	E	VB	E	VB	VB	G
	(D)	F	F	F	G	E	E	G
	(E)	F	B	F	F	E	G	G
	(F)	G	G	G	G	F	G	G
	(G)	F	G	G	G	E	E	G
Linguistic variable		E:Excellent, G:Good, F:Fair, B:Bad, VB:Very Bad						

Table 2 Concordance dominance index

Evaluated Alternative	A	B	C	D	E	F	G
Concordance Dominance Index	-2.121	-0.636	0.193	0.967	-0.322	0.829	1.089

4. Conclusion

Multi-criteria method can be used in decision making, particularly when several aspects containing fuzziness arise within various possible options. This method is applied effectively in evaluating model for cargo transportation system between two large cities in Indonesia.

ストラドルキャリア方式コンテナターミナルを対象としたコンテナ配置計画

正会員　○西村　悦子（神戸大学）　　非会員　江村聡一郎（株式会社商船三井）

要旨

世界の港湾コンテナターミナルで使用される荷役機器をみると、タイヤ式門型クレーン（RTG）が最も多く、次いでストラドルキャリア（SC）が多いが、国内の新設ターミナルでは SC が採用されるケースは少ない。そこで本研究では、SC に着目し、オペレーション上で評価指標となるサービス時間と保管スペースの利用率について考え、ターミナル内のコンテナ配置問題取り上げる。コンテナブロックの取扱い、SC 性能の高度化等の様々な条件下において、SC が RTG と同等もしくはそれに近い評価になるケースについて検討する。

キーワード：物流・海運、コンテナターミナル、コンテナ配置計画、ストラドルキャリア

1. はじめに

近年、コンテナ船の大型化は著しく、積載容量 10000TEU を超える超大型船は文献(1)によると、2013 年 8 月末時点で 188 隻、前年 2012 年 8 月末時点で 153 隻となっており、この 1 年で 35 隻が新たに就航を開始している。超大型船の航路はアジア－欧州・北米間が中心であるが、最近はアフリカ航路にも超大型船が就航し、範囲も拡大している。

こうした中で、現在でも日本への超大型船の寄港実績はあるものの、貨物取扱量はさほど多くないのが現状であり、同様に他船型船の寄港も他の主要港湾に比べると、格段に少ない。

またコンテナターミナルでは、多数のコンテナが一時的に保管されることから、どのコンテナをヤードエリア内のどこに保管するかで荷役作業時間長は異なる。時間延長を抑えることは、着岸時間の短縮とそれに伴う岸壁使用料の低減につながり、ハブ・アンド・スポーク輸送でボトルネックとして指摘されることが多いハブ港において二次輸送網への接続も期待できる。そこで本研究では、本船荷役に関わる作業時間延長を抑えるような、コンテナ配置問題を考える。

ところで、世界の主要港湾を見ると、採用される荷役機器のタイプは、設置時期や地理的背景などによって異なり、各タイプに適するターミナル規模やレイアウトも異なる。現在、タイヤ式門型クレーン（Rubber Tired Gantry Crane, RTG）は世界中で採用件数が最も多く、次いでストラドルキャリア（Straddle Carrier, SC）が多い。よって本研究では RTG と SC のターミナルを対象にコンテナ配置問題を考える。

2. 関連研究における本研究の位置づけ

まず、コンテナの配置問題を考える際、コンテナ個々による個別扱いか、同一船や同一仕向地別でまとめた複数個によるグループ扱い（コンテナ群と呼ぶ）、によって必要となる条件が異なる。　後者の 1 グループ規模は、1 ヤードベイ（コンテナの幅方向と高さ方向から成るコンテナ群）以上、1 ブロック（搬送車両の通路で囲まれたコンテナ群）未満での運用とし、コンテナの荷繰りに伴うリハンドル作業を考えなくて良いことからこの条件下で問題を扱う。そこで、コンテナ群扱いでの配置問題の評価指標には以下があり、文献(2)では RTG の移動時間の最小化、文献(3)ではトレーラーと RTG の移動コストを最小化している。

また、著者らの先行研究[(4)-(6)]には、コンテナを仕向地船別にグループ化し、超大型船が寄港するコンテナターミナルを対象としたものがある。文献(4)は超大型船 1 隻と複数フィーダー船間での貨物の移動を想定し、トランシップコンテナの一時保管場所を決定する問題を扱っている。文献(5)では、フィーダー船担当の岸壁クレーン（QC）数を複数機対応できる問題に拡張し、文献(6)ではコンテナのフローを超大型船からフィーダー船への一方向から、両方向へ拡張している。

また文献(2)から(6)では、世界で最も多く採用される RTG を前提としている。しかしながら、国内の公共埠頭、欧州のアントワープ港等では SC が好まれ、また最新のターミナルではレール式門型クレーン（Rail Mounted Gantry Crane, RMG）が導入され、自動化・無人化が進んでいる。

そこで次に、荷役方式の比較を行った研究について紹介する。文献(7)では、2 タイプの自動化ターミナル、Automated Lifting Vehicle（ALV）と Automated Guided Vehicle（AGV）の性能比較を行っている。文献(8)では、SC と ASC のそれぞれ荷役シミュレーションモデルを構築して有人と無人のシステムを比較している。いずれの研究も、コンテナターミナル内のコンテナ配置については考慮していない。

本研究の先行研究には、主として使用される荷役機器とターミナルレイアウトの特徴がコンテナの配置計画にどのような影響をもたらすかを示した文献(9)がある。ここでは、総サービス時間とスペース占有率を評価指標としており、計算結果として、港の混み具合や係留パターンに関わらず、RTG で評価が高くなることが示されている。また問題での SC の取扱いについて、追加で分析が必要となることを示唆できる。そこで本研究では SC に着目し、コンテナブロックの取扱い（ブロック数や各ブロックの容量等）、SC の性能の高度化や走行通路の設定方法等の様々な条件下において SC が RTG の評価に近くなる場合について調査する。

具体的には、ヤード内でのコンテナ配置場所決定の最適化を行って、RTG と SC に関して比較することで、どのような状況下の港湾において SC が RTG と同等、もしくはそれに近い評価を得られるのか明らかにすることが本研究の目的である。

3. 問題の概要

本研究の評価指標に、文献(4)から(6)で使用したサービス時間の最小化に加え、保管スペース占有率の最小化を設けることにした。この理由について述べる。サービス時間最小化は、対象船舶の滞在時間が延長されると岸壁使用料も増加し、それ以降のスケジュールに影響を与えることから時間は短い方が好まれる。また、スペース占有率とは、同一面積、同一個数のコンテナを保管する場合、まとめて置くか、広範囲に置くのかの保管状態を示す。一般的に、各ブロックに割り当てられた荷役機器の作業がスムーズに行われるように、船 1 隻に積載予定のコンテナは複数ブロックに分けて保管される。ただし、利用ブロック数が多すぎて広範囲になると、マシンのブロック間移動の増加や割当マシン数の増加が必要となる。そこで本研究では、複数コンテナ群で特定のブロックをシェアし、対象コンテナが使用しないスペースは輸出入等の対象としていないコンテナが利用できるスペースを確保するために、スペース占有率の最小化を設ける。

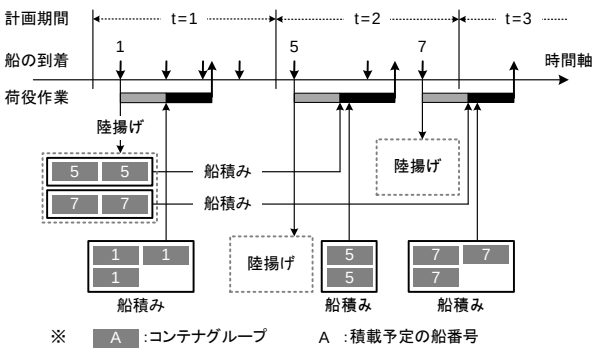


図 1 時系列でのターミナル内のコンテナフロー

コンテナの取扱いは、文献(2)から文献(6)と同様に、仕向地別・船別に複数コンテナから成るコンテナ群とし、トランシップコンテナのみを対象とする。さらに、各コンテナグループを当該ターミナルまで運んできた船（移入に利用する船）と、一旦保管後、積む予定の船（移出に利用する船）は所与とする。全計画対象期間、例えば 7 日間を 1 日ごとに区切り、区切った後の期間にどの船が到着するかで当該期間の対象船を決定する。船の到着時刻は出港時刻の計測のためには使用するが、保管場所決定のために、到着時刻そのものは採用しない。図 1 には、時系列でのターミナル内のコンテナフローを示す。横軸に時間軸を取り、計画 3 期間目の途中までが示されている。船 1 から船 7 までの到着を示す。ここで、例として船 1、船 5、船 7 について説明すると、それぞれ期間 1、期間 2、期間 2 に到着し、期間 1、期間 2、期間 3 に出港している。船 1 と船 5 のように到着する期間に出港するケースや、船 7 のように次の期間に出港するケースがある。船 1 から陸揚げされた船 5 と船 7 に積載予定のコンテナを一旦ヤード内の空スペースに保管し、既にヤード内で待機していたコンテナを積載して出港する。船 5 は陸揚げ作業後、船 1 が運んできたコンテナと既にヤードに待機済みのコンテナの両方を積載して出港する。船 7 は船 5 と同様である。

4. 運用タイプ

先述のように、RTG または SC を採用する港湾ターミナルを想定して、コンテナ配置問題を考えるためには、荷役機器の違いを明確に反映させる必要がある。これには、同一規模・同一形状のターミナルを前提に、次のことを整理する必要がある。

表１　本研究で採用した各運用タイプ

タイプ名	内容
RTG	RTG 方式を採用するターミナル
SC-1×7Cap	SC 方式を採用するターミナルで、1 ブロック容量が 7 コンテナ群（従来 SC と呼ぶ）とする場合
SC-0.9	従来 SC に比べて、荷役時間 10%短縮可能な高性能な SC を採用する場合
SC-0.95	従来 SC に比べて、荷役時間 5%短縮可能な高性能な SC を採用する場合
SC-7×1Cap	従来 SC のブロックサイズを 7 分割し、1 ブロック容量が 1 コンテナ群とする場合
SC-route	従来 SC のエプロン部分の走行ルートを改良して、小回りができるようにする場合

（ａ）コンテナブロックで表現される、コンテナを配置するスペースのレイアウト

（ｂ）コンテナブロック間に設置される走行通路の配置

（ｃ）荷役機器の稼働範囲の違いに伴う、岸壁エプロンエリアとヤード保管エリアとの間でのヤードトレーラーまたは SC の動き

上記に示した項目を荷役機器の違い、ならびに同一機器での運用形態の違いを荷役時間データに反映させることが出来れば、これをパラメータ（入力データ）として与えることで、コンテナ配置問題を解くことが可能となる。

RTG と SC の両荷役機器について荷役オペレーションの詳細について述べる。ここで、想定する運用形態は RTG での 1 タイプ、および SC の 5 タイプで、全 6 タイプがあり、表 1 に示す。なお、コンテナ保管場所決定は、コンテナ群単位で行うため、コンテナ群 1 つを 100 個のコンテナから構成されると仮定する。

5. 解法

本研究では、遺伝的アルゴリズム（GA）を利用して近似解を求めることとした。図 2 に解の表現事例を示す。複数期間の計画を行うが、当該事例では 2 期間分を示す。コンテナグループ 1～10 が期間 1 に、11～20 が期間 2 に到着することを意味しており、それらの移入に利用する船番号をそれぞれ 1～4、5～8 で示している。また、各コンテナグループは一旦ターミナル内のいずれかのヤードブロックに保管された後、所与の移出に利用する船に積載され、次の港に向けて出発する。なお、ある期間に到着するコンテナが同一期間に到着する別の船に積載されるケースはほとんどないため、次の期間以降にやって来る船に積載することとし、本事例においても、期間 1 では船番号 5 以降、期間 2 では船番号 9 以降が移出に利用する船として与えられている。

	1										2									
コンテナグループ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
移入に利用する船	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8	8
移出に利用する船	5	7	7	5	5	6	7	7	5	10	11	9	12	10	12	13	9	11	9	11
ヤードブロック	6	8	2	7	1	12	1	3	6	11	1	8	2	7	5	5	1	3	6	10

図 2　個体表現事例

このように、各コンテナグループには移入と移出に利用する船が事前に分かっており、各コンテナグループを保管スペースの容量制約を満足するよう、ヤードブロックにランダムに割り当てる。本事例では、コンテナグループ 1 と 9、5 と 7 がそれぞれブロック 6 及び 1 に保管されることを意味する。同様に期間 2 では、コンテナグループ 11 と 17、15 と 16 がそれぞれブロック 1 及び 5 に保管される。

5. 数値実験

5.1　使用データの概要

全対象期間を 1 週間（7 日間）とし、その間にやって来る船を対象とする。ターミナルの規模は、400m×4 バース＝1600m の直線バース、奥行き 400m とする。また、各船の到着分布は、平均到着間隔 3 時間、4 時間、5 時間の指数分布とし、それぞれ乱数のタネにより 10 パターン設定する。また、各船の荷役コンテナグループ数も 10 パターン設定し、荷役時間計測に利用する。つまり、船の到着 3×10 パターン、荷役個数 10 パターンを組み合わせた合計 300 ケースの計算結果について、運用タイプの違いで比較を行う。

5.2　計算結果

図 3 に平均到着時間 3 時間、離散型係留でのパレート解集合の事例を示す。これより、2 目的問題として考えた場合は、やはり RTG が優れていることが分かる。しかし、スペース占有率だけに注目すると SC-route が優れており、総サービス時間に関しては SC-0.95 も RTG と同等の結果も出ている。

次に 2 目的最適化問題を扱うため、タイプ別に得

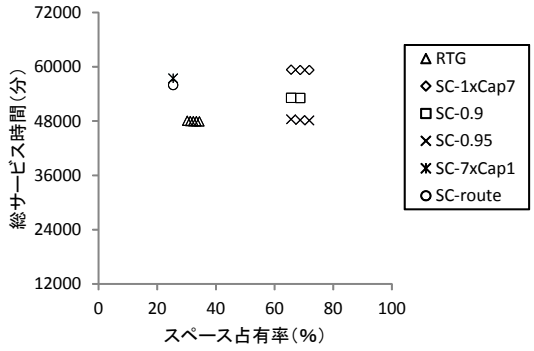


図 3　パレート解の分布状況

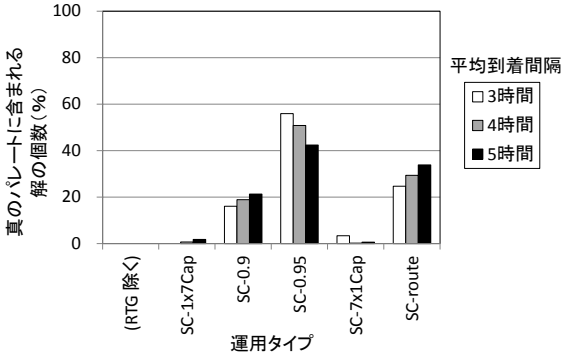


図 4　SC 内で真のパレートに含まれる解の割合

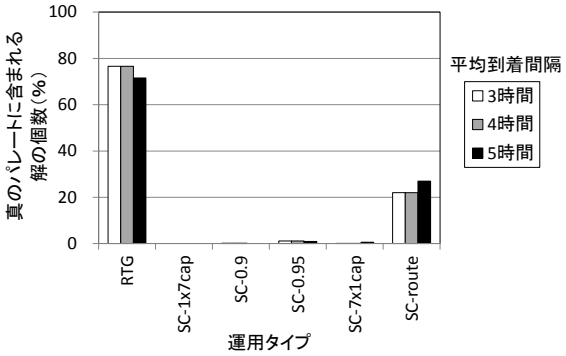


図 5　RTG を含む真のパレート解集合に含まれる解の割合

られたパレート解集合の中から真のパレート解を求めた。まず SC 内のタイプ間で比較するために、SC の解集合から真のパレートを求め、これに含まれる解の個数割合を図 4 に示す。SC 内では、SC-0.95 > SC-route > SC-0.9 の順に割合が大きく、SC-0.95 の割合は約半数となっている。したがって、荷役方式を SC だけで考えると、SC-0.95 が良いケースが多く SC-route は約 4 割のケースで良い結果を示す。さらに、RTG を含む場合での結果を図 5 に示す。RTG も含む真のパレート解集合について考えると、RTG が良いケースが多いが、SC 方式が優れているケース（SC-route）も約 2 割存在することが分かった。

6. おわりに

総サービス時間とスペース占有率について考察すると、RTG が最も良い結果を示した。この結果は、国内外で RTG が最も多く採用されている荷役機器であることを裏付けている。また SC が総サービス時間、またはスペース占有率の一方だけで RTG の結果を上回ることは、本研究で与えた条件では可能であった。したがって、コンテナブロック分割、SC 自体の性能、走行ルートを工夫することができれば、SC の作業効率は大きく向上することがわかった。

参考文献

(1) 日本郵船調査グループ編：世界のコンテナ輸送と就航状況 2013 年版，日本海運集会所，2013.

(2) Kim, K. H. and Bae, J. W. : Re-marshaling export containers in port container terminals, Computers & Industrial Engineering, Vol.35, pp.655-658, 1998.

(3) Kim, K. H. and Park, K. T. : A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers, European Journal of Operational Research, Vol.148, pp.92-101, 2003.

(4) Nishimura, E., Imai, A. and Janssens, G. K. : Container Storage and transshipment marine terminals, Transportation Research Part E, Vol.45, pp.771-786, 2009.

(5) Nishimura, E. and Sunagawa, J. : Container storage problem at terminals where the mega-containership calls with multiple QCs assigned to a feeder ship, Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation and Logistics (T-log2010), available in CD-ROM, 2010.

(6) 西村悦子，今井昭夫 ： 超大型船寄港ターミナルでのヤード配置計画に及ぼすコンテナ取扱量の影響，土木計画学研究・論文集, Vol.27, No.4, pp.795-802, 2010

(7) Vis, I. F. A. and Harika, I. : Comparison of vehicles at an automated container terminal, OR Spectrum, Vol.26, pp.117-143, 2004.

(8) Vis, I. F. A. : A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal, International Journal of Production Economics, Vol.103, pp.680-693, 2006.

(9) 西村悦子，今井昭夫：コンテナ配置の最適化による荷役方式の比較，土木計画学研究・論文集, Vol.69, No.5, pp.659-667, 2013.

津波来襲時における岸壁に係留された船舶の防災・減災対策に関する研究（その 4）-浮体式津波対策用岸壁の有効性について-

正会員　増田　光弘（東京海洋大学）　学生会員○橋本　洋佑（東京海洋大学）
正会員　　南　清和（東京海洋大学）　非会員　　増田　光一（日本大学）

要旨

前報では、津波による船舶の岸壁への乗り揚がりの被害を防ぐことを目的として、浮体式津波対策用岸壁を提案し、その適用可能性について検討を行った。本報では、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災時、観光船が係留されていた浮桟橋が無事だった宮城県塩釜港の事例を対象として、地震発生から津波来襲までの当時の状況の再現を行うことによって、浮体式津波対策用岸壁の有効性を示す。

キーワード：港湾・係留、津波、浮体式津波対策用岸壁

1. 緒言

岸壁に係留された船舶の係留索の破断に伴う船舶の乗り揚がりを防ぐ対策の一つとして浮桟橋のような浮体式津波対策用岸壁[(1)]が挙げられる。しかし、浮桟橋は海底に固定された係留柱に係留されており、地震が発生した際､係留柱とともに浮桟橋も振動し、船体を押し出すことにより、係留索が破断するような事態が発生する可能性があり、その場合、船舶は不完全な状態で津波の脅威に備えなければなない。そこで本研究では、非線形的な現象を解くことに特化している粒子法の一種である MPS 法を用いて、浮桟橋に係留された船舶の地震と津波による被害を統一的に検討し、災害時の浮桟橋係留の有用性を示すことを目的とする。

2. 地震動による係留柱振動に伴う係留索の破断予測シミュレーション

本シミュレーションでは、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災時、観光船が係留されていた浮桟橋が無事だった宮城県塩釜港の事例を参考に、長さ 30.0m、幅 6.0m、深さ 4.0m、喫水 2.0m、排水トン数 272.48 トンの船舶と長さ 50.0m、幅 9.0m、深さ 3.0m、喫水 1.0m の浮桟橋を対象とし、3 次元 MPS 法を用いて検討を行った。地震波は東日本大震災時福島県浪江町において観測された 14 時 48 分 25 秒から 15 秒間の波形を 1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍したものを用い、地震動として係留柱に与えた。地震波と係留索の組み合わせを Table 1 に示す。船舶はヘッドライン Line 1，フォアスプリング Line 2､アフトスプリング Line 3、スターンライン Line 4 によって係留し、破断時伸び率を 50%とした。

Table 1　Combination of seismic wave and tether

	地震波	係留索径
Case 1	1.0 倍	なし
Case 2	1.0 倍	30mm
Case 3	1.0 倍	40mm
Case 4	1.5 倍	40mm
Case 5	2.0 倍	40mm

計算結果として Table 2 に Case 1 から 5 における係留索の最大伸び率を示す。Case 1、2、3 においては、係留索は破断せず、最大伸び率にも大きな差が見られなかった。しかしながら、短い係留索である Line 2 および 3 の伸び率は 30%を超えるという結果となった。さらに､Case 4 および 5 においては Line 2 および 3 が破断するという結果となった。

Table 2　Maximum tether’s stretch rate

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
Case 1	14.48%	34.45%	33.41%	12.65%
Case 2	13.58%	32.37%	32.71%	12.82%
Case 3	13.17%	31.43%	32.21%	12.66%
Case 4	21.98%	破断	破断	24.91%
Case 5	27.76%	破断	破断	31.74%

3. 津波中の浮桟橋に係留された船舶の応答シミュレーション

固定岸壁および浮桟橋に船舶を係留した状態で

左舷正横から模擬津波を入射させた。対象船舶および浮桟橋は第 2 章と同じものを用いた。係留索径は 40mm とし、模擬津波には 3.2m の段波を用いた。

計算結果として Fig. 1 に固定岸壁に係留した船舶と浮桟橋に係留した船舶の重心位置の軌跡を示す。Fig. 2 に固定岸壁に係留した場合のスナップショットを、Fig. 3 に浮桟橋に係留した場合のスナップショットを示す。Fig. 1～Fig. 3 から、固定岸壁に係留された船舶は乗り揚りが発生しているが、浮桟橋に係留された船舶は浮桟橋が船舶とともに浮上するため、乗り揚りが発生しないことが確認できた。

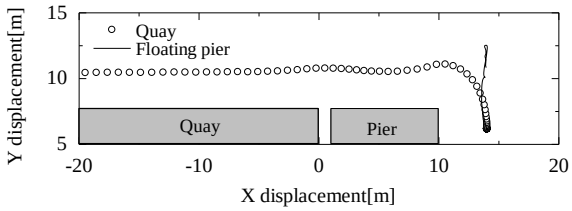
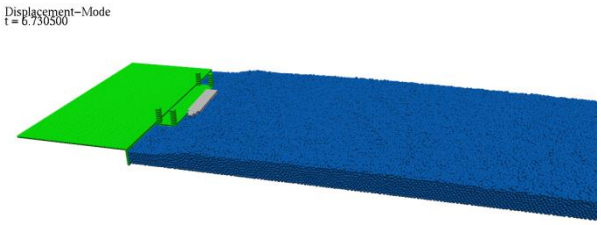
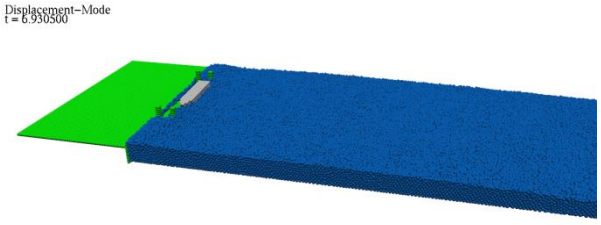


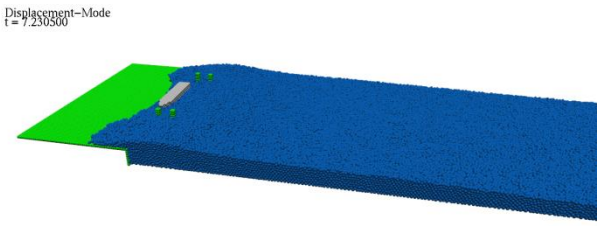
Fig. 1　Trajectory of the vessel



a) Time = 67.3sec

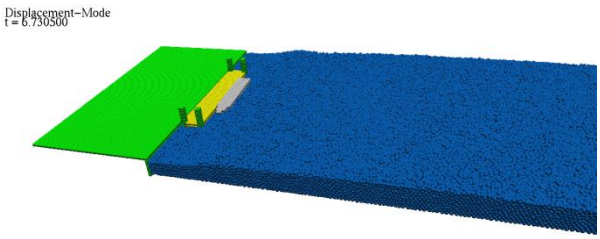


b) Time = 69.3sec

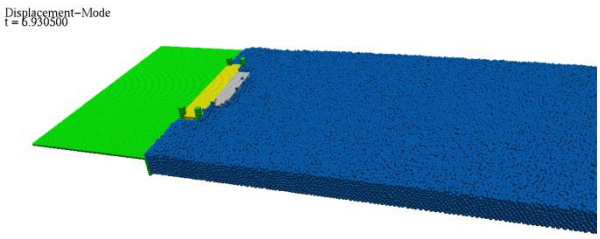


c) Time = 72.3sec

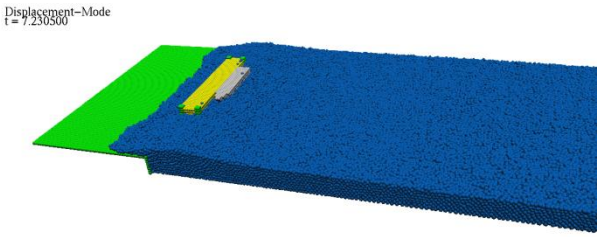
Fig. 2　Snapshot of simulation results (Quay)



a) Time = 67.3sec



b) Time = 69.3sec



c) Time = 72.3sec

Fig. 3　Snapshot of simulation results (Floating pier)

4. 結言

本研究の結果より、以下の知見を得た。

1) 東日本大震災のような大規模な地震の場合、短い係留索に大きな負荷がかかることがわかった。また、地震による係留柱の揺れ方によっては短い係留索が破断する可能性があることがわかった。

2) 浮桟橋に係留することで係留索の破断および船舶の乗り揚りを防ぐことが可能であることがわかった。また、本シミュレーションからも宮城県塩釜港の船舶および浮桟橋が無事だった事例を確認することができた。それによって、浮体式津波対策用岸壁の有用性を確認することができた。

5. 参考文献

(1) 増田光弘・南清和・増田光一：津波来襲時における岸壁係留された船舶の防災・減対策関す研究 （その 3）—浮体式津波対策用岸壁 の提案—, 日本航海学会講演予稿集, Vol.1, No.2, pp.25-28, 2013

津波被害減災のための可動式防波扉の適用性に関する研究（その 1）

正会員　増田　光弘（東京海洋大学）　学生会員○藤田　慶彦（東京海洋大学）
正会員　　南　清和（東京海洋大学）　非会員　　浜田　英外（日揮株式会社）

要旨
本研究は津波を起因とする浸水被害や小型船舶の陸域への乗揚げといった沿岸域の津波被害を統一的に低減するための可動式防波扉を提案するとともに適用性を検討する。水槽実験より、防波扉を設置することにより遡上水位の低減効果や小型船舶模型の乗揚げ防止の可能性を確認することができた。
キーワード：港湾施設、津波被害減災、船舶の乗揚げ防災

1. 緒言

津波が沿岸域に来襲した場合、津波の陸域への遡上と津波により漂流物となった船舶の流入などによって多くの人命が危険にさらされることになる。そこで本研究では、陸域への津波の流入を低減・遅延させ、沿岸域の住民の避難のための時間を確保するとともに、港内に係留されている小型船舶の乗揚げを防止し、沿岸域の住民、建築物、係留船舶の被害を減災することを目的とした可動式防波扉を提案する。本研究では、模型実験によって防波扉の入射津波低減性能および船舶の乗揚げ抑制性能に影響する項目について計測を行い、可動式防波扉の適用可能性について検討を行う。

2. 可動式防波扉コンセプト

本可動式防波扉は、以下のような基本コンセプトに基づき考案した。

1) 本防波扉は被害の減災が目的であり、一定の効果を発揮した後には、壊れてもよいものとする。
2) 防波扉の主部材は経済的かつ軽量な材料が望ましいことから、木材を用いる。
3) 対象津波高を 3.0m とし扉体の標準的なサイズを高さ 1.5m~3.0m、幅 5.0m、厚さ 0.15m とする。
4) 陸側の長辺を固定面に繋ぎ、津波の流入によって海側の長辺が直角に立ち上がる構造とする。
5) 平常時は沿岸域に倒伏させた状態で設置され、景観を阻害しない。

3. 実験概要

日本大学理工学部所有の二次元水槽において模型実験を行った。実験は以下の 2 パターンである。

1) 可動式防波扉の水位低減性能の確認 (Exp.1)
2) 可動式防波扉による小型船舶の岸壁への乗揚げ防止に対する適用性の検証 (Exp.2)

それぞれの模型設置概要図を Fig. 1、Fig. 2 に示す。

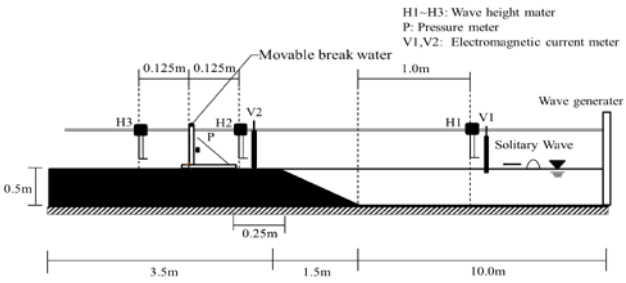


Fig. 1　Experimental setup system (Exp.1)

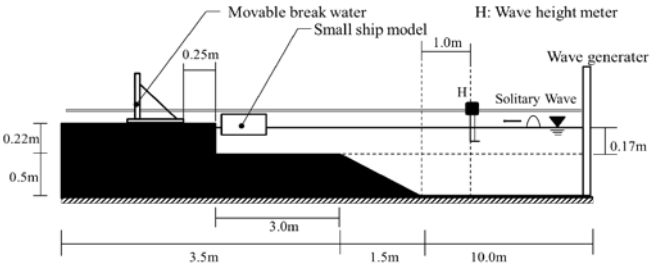


Fig. 2　Experimental setup system (Exp.2)

Exp.1 では、Fig. 1 のように水槽内の仮底上に防波扉模型を設置し、H3 地点における遡上水位を計測し、比較することで防波扉の遡上水位低減性能を検討した。防波扉の受ける水平波圧は防波扉下端 0.02[m] の P1、0.04[m]の P2 の位置で計測した。Exp.2 では水槽内の仮底上に設置した岸壁模型上に防波扉模型を設置し、入射波による両模型の挙動を映像的に確認することで、岸壁への小型船舶の乗揚げ防止に対

する防波扉の適用性を検討した。模擬津波には、ピストン式造波板によって造波された孤立波を用いた。Exp.1 の入射波高は 0.04m～0.08m とし、0.01m 刻みで造波した。Exp.2 の入射波高は 0.14m とした。なお小型船舶模型はスタイロフォームで作成した矩形浮体を用いた。

4. 実験結果および考察

Exp.1 の防波扉未設置時と防波扉設置時における遡上水位の低減率を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、本可動式防波扉は遡上水位を最大 70%程度、最低でも 50%程度低減できる可能性があることが確認できた。

Exp.1 におけるP1 の最大値と陸上建築物に作用する津波荷重の算定式(1)により算出した理論値を比較したものがFig. 4 である。式(1)はそれぞれq_z：構造設計用の進行方向の津波波圧[kN/m^2]、ρ：水の単位体積質量[t/m^3]、g：重力加速度[m/sec^2]、α：安全率(3)、η：設計用浸水深[m]、z：当該部分の地盤面からの高さ(0≦z≦3η)[m]となっている。

$$q_z = \rho g(\alpha\eta - z) \quad (1)$$

Fig. 4 より、両者の増加傾向が一致していることがわかる。しかし、全ての入射波に対して実験値が理論値を上回る結果となった。これは算定式が遡上津波の入射角度や防波扉上端からの越流などを考慮していないためであり、津波荷重を過小評価している可能性があることを示唆していると考えられる。

Exp.2 では、Fig. 5 のように津波の入射とともに防波扉模型が起動することによって、防波扉からの反射波によって小型船舶模型の乗揚げを防ぐことが可能であることが確認できた。また、小型船舶模型の設置位置によっては防波扉に衝突して船舶の乗揚げを防ぐ結果となったが、いずれのケースにおいても防波扉が破損することはなかった。

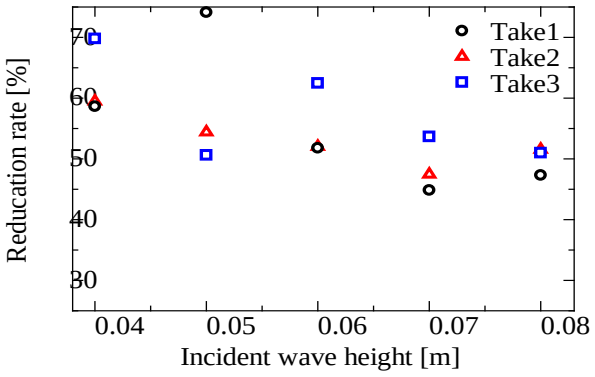


Fig. 3　Comparison of reduction rate of water elevation by movable break water (H3)

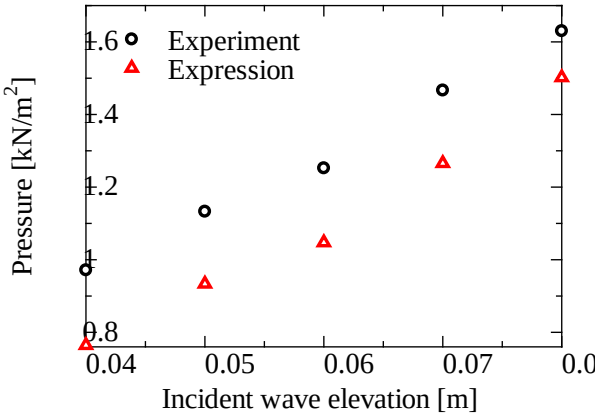
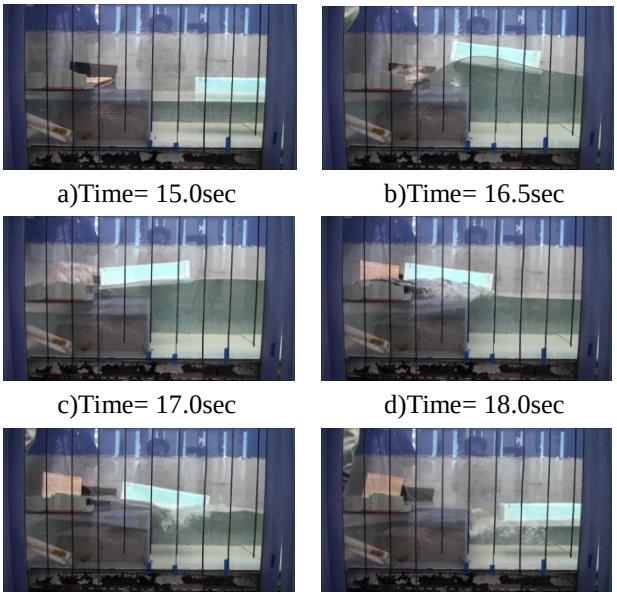


Fig. 4　Comparison of water pressure (P1)



a)Time= 15.0sec　b)Time= 16.5sec
c)Time= 17.0sec　d)Time= 18.0sec
e)Time= 18.5sec　f)Time= 19.5sec

Fig. 5　Snapshots of movable break water and small ship model

5. 結言

本可動式防波扉は、陸域への津波の流入を低減可能であるとともに、船舶の岸壁への乗揚げを防ぐことが可能であることがわかった。今後は、異なる状況を想定した実験や、数値シミュレーションによる検討などによって、更なる実現性について検討していく予定である。

6. 参考文献

1)　木村 雄一郎，新里 英幸，仲安 京一，安田 誠宏，間瀬 肇：フラップゲート式可動防波堤の波圧応答特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.B2-65，pp.806-810，2009.

The Modernization Process of Key Algerian Ports: Issues and Strategic Challenges

○Member S.T.MAKSEN (Ecole Nationale Superieure Maritime, Algeria)
Non-member K.ISHIGURO (Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Japan)
Member S.FUJIMOTO (Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Japan)
Member M.OMAE (Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Japan)

Abstract

Algeria is the largest country opening to the Mediterranean Sea and its coastline stretches over 1300 km. The Algerian port system is composed of 11 commercial ports, 3 hydrocarbon terminals (STH-Arzew, Bejaia and Skikda) with a global average of the annual traffic of more than 127Mt. Taking into account the productivity, various data and information provided on Algerian port services, inefficient port operations, congestion, delays, strategic planning, SWOT and DEA tools, and poor connectivity which were highlighted by diverse institutions (ITF, 2013), it is necessary to introduce new frameworks to evaluate and assess sustainable development. This study summarizes current situation of Algerian ports and discusses methods for assessment of future plan.

Keywords：Port system, Strategic planning, SWOT analysis, DEA

1. Introduction

Considering national and international contexts, within which those have grown and be pointed out by clients, new concerns and needs were brought to light, fostering new reforms and adequate response to current problems. Additionally, with regard to the national scope, a particular focus on strategic planning and management tools used by the Algerian port community and experiences in this context are offered. The latter represents a challenge for the national Algerian policy makers and port authorities (UNCTAD, 1993). Dooms (2013) pointed out that “Port authorities have become aware that spatial and environmental parameters have to be included in order to secure long-term port development.”.

This study consists of an analysis of a set of statistics on Algerian ports and discussion on two methods for assessment of future plan. Applicability of SWOT analysis and Data Envelopment Analysis (DEA) are discussed. This study tries to tackle these complex issues related to strategic port development (OECD, 2013), port reorganisation and modernisation.

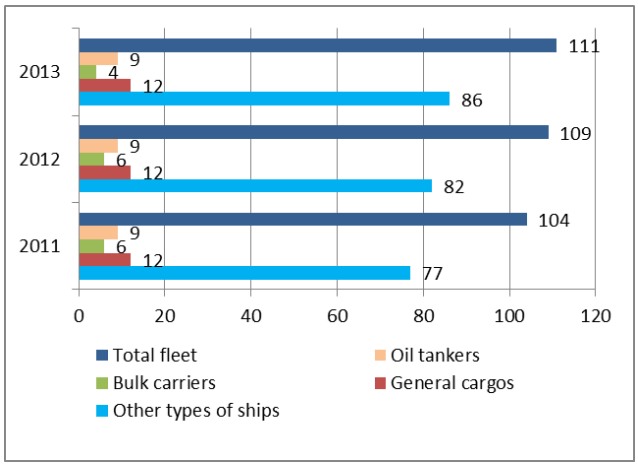
2. Current situation of Algerian Ports

The national port system permits more than 90% of foreign trade to transit through facilities in Algeria. The promulgation of a national Law N°.98-05 of 25th June 1998, amending and supplementing the Statute of the Maritime Code, stipulates clearly the principle of separation between public services and commercial port activities. Numerous port issues are put on the agenda to promote modernization of facilities, such as:

- Institutional coordination and overall planning;
- Port sector management and operational efficiencies;
- Port investment planning and productivity measures;
- Pricing and fiscal policy.

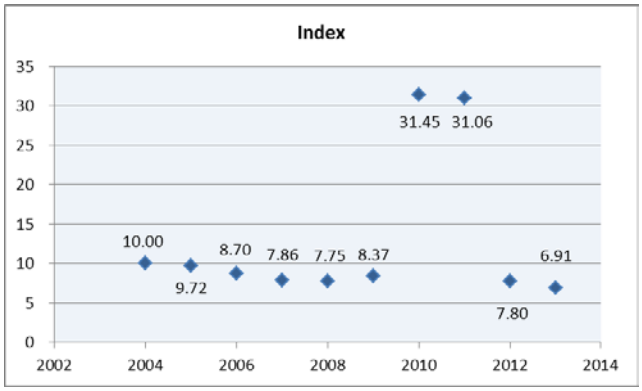
The overall efforts and goals are part of an ongoing process, which is a program of port economics and sector works to respond to lack of efficiency, lack of productivity and to support the modernization of the country’s main ports. The rapid growth in port traffic in Algeria regarding the latest statistics available highlights the need of strategic planning for port authorities.

Figure 1 shows a transition of a number of Algerian registered ships from 2011 to 2013. The bar chart shows a flattening of the number of Algerian registered ships. Figure 2 shows transition of liner shipping connectivity index from 2004 to 2013. As can be seen from the chart that some peaks occurred and connectivity issues are to be considered.



Source: Author compilation, *UNCTAD statistics*, 2014

Figure 1: Number/type of Algerian registered ships



Source: Author compilation, *UNCTAD statistics*, 2014

Figure 2: Liner shipping connectivity index

3. Methods for assessment

3.1. SWOT analysis

SWOT analysis is one of the most productive methods to provide a deep insight about current situation of a certain subject. Corresponding factors of the subject are evaluated and classified into four categories: internal strengths (S), internal weaknesses (W), external opportunities (O) and external threats (T). This method is also often applied to evaluate a future plan. Current situation and future plan of Algerian port system can be discussed based on the result of the method before conducting quantitative analyses. It is noted that interview survey is necessary to collect and summarize factors related to Algerian ports.

3.2. DEA

Data Envelopment Analysis (DEA) is one of the most useful methods to evaluate the efficiency of a certain subjects. Comparative efficiency among Algerian ports and neighboring ports are quantitatively evaluated by this method. Any factors can be selected simultaneously in the analysis. An analysis of port issues which were not assessed in the past can be provided through the use of DEA to evaluate the efficiency of Algerian port facilities. It is noted that various data should be collected even if not published in order to compare Algerian ports with foreign ports.

4. Conclusion

This study summarizes current situation of Algerian ports and discusses methods for assessment of future plan. Point of issues and problems are still ambiguous, however those are made clear by SWOT analysis and DEA in near future. We will discuss number of recommendations on port modernization, policy aspects and potential countermeasures to be implemented.

5. References

1. Algerian eleven ports statistics, SOGEPORT, Ministry of Transport, 2002-2012.
2. Cooper, W.W., Seiford, L.M. and Tone, K. (2000) *Data Envelopment Analysis*. Kluwer. Boston.
3. Pjevčević, D. *et al.* (2012) DEA Window Analysis for measuring port efficiencies, *Traffic Management Review, Traffic and Transportation*, Vol.24, No.1, pp.63-72.
4. International Transport Forum (ITF) (2013) *trends in the Transport Sector 1970-2010*, OECD. http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/maritime/index.html, (Mars 2014).
5. Pierre, C., Dagnet, F. and Fedi, L. (2013) The new governance structure of French seaports, *International Association of Maritime Economists (IAME) Conference*, Marseilles, France, 3-5 July 2013.
6. Washington, S.P. *et al.* (2003) *Methods for Transportation Data Analysis*, Chapman & Hall, CRC, London.
7. UNCTAD, *statistics year book*, 2013.
8. WTO, *Statistic Yearbook*, 2013.
9. UNCTAD, "*Strategic Planning for Port Authorities*", Intergovernmental Group of Port Experts, General UNCTAD/SHIP/646, 29 July 1993.
10. Dooms *et al.* (2013), "*Stakeholder management and*

path dependence in large-scale transport infrastructure development: the port of Antwerp case (1960-2010)". Journal of Transport Geography, 27, pp.14-25. www.porteconomics.eu.

(2014/03/12)

東北地方太平洋沖地震津波来襲時の桟橋係留大型石炭船の挙動再現について

正会員　○榊原　繁樹（東海大学）　非会員　阿部　郁男（富士常葉大学）
正会員　　津金　正典（東海大学）　正会員　久保　雅義（神戸大学名誉教授）

要旨
東北地方太平洋沖地震津波の来襲に伴い大きな被害を受けた揚炭桟橋で係留・荷役中であった大型石炭船の挙動につき、可能な限り入手できた被災当時のデータと被災状況を把握・整理した。合わせて津波および船体動揺シミュレーションを実施して当該津波来襲時の船体挙動や被災状況の再現を試みる。
キーワード：港湾・係留、津波、船体運動、海難、海洋工学

1. 研究目的

著者らは東北地方太平洋沖地震津波来襲に伴い被災したＳ港原油桟橋で荷役・係留中であったVLCCを対象として、津波および船体動揺シミュレーションを行うと共に、船長レポートに記載された事項やAIS による実測船体位置データと照合することにより、急激な押し波と本船推進力の発動などにより大きな船体動揺が誘発され、合わせて係留索巻き出しによる弛緩と緊張の繰り返しや切断および防舷材に過圧縮が生じるなど、船長・乗組員の方々が遭遇した過酷でかつ危険な船舶の係留状況を定量的に把握することを試みた[(1)]。またＯ港では係留避泊に成功したアフラマックスタンカー(10 万トン級原油タンカー)の船体および海面状況について､当時乗船されていた方へのヒアリング調査を行うことにより、係留避泊できた状況の把握、さらにはその要因について津波および船体動揺シミュレーションを行なって検討した[(2)]。

東北地方太平洋沿岸の他の港でも多数の大型船の被災実態が報告されているが[(3)]、本研究ではＨ港で当該地震津波来襲に伴い係留・荷役中に大きな被害を受けた大型石炭船の挙動につき、可能な限り入手できた被災状況を整理すると共に、合わせて津波および船体動揺シミュレーションを用いて被災当時の船体挙動の再現を試みる。

2. 研究内容

図 1 に津波来襲時の当該大型石炭船（Lpp=218m, B=36.5m, d=12.1m, W=83,197ton)の係留状況を示す。本船は荷役を開始したばかりでほぼ満載状態で津波来襲を受けた。揚炭機（アンローダー）はNo.2 ホールドに挿入されて当初荷役を行っていたが、地震による停電によりアンローダ先端部はホールド内に残された。津波高さは痕跡高さから 10m超で、防波堤や陸岸を越える越流を生じた。津波第 1 波来襲時に大きなPitch を生じていたことがビデオ映像から把握された。また桟橋設置の防舷材 6 基が破損して、当該石炭船が桟橋に接触したと思われる桟橋損傷もみられた[(4)]。合わせて係留索 16 本全数が破断または巻き出された。これに伴い大きな船体動揺が生じ、本船はアンローダ先端部を引きちぎり桟橋から流出して、港内を漂流した。

当該石炭船が桟橋から流出するまでの船体動揺量や係留力などの船体挙動の再現を試みた。これに際して津波シミュレーションは地震発生時 14:46～16:46(7200s) 間の 2 時間分を実施し、船体動揺シミュレーションでは防舷材の過圧縮から破損に至るまで、さらには破損後に本船が桟橋に接触して桟橋からの反力が作用する状況のモデル化も行った。またホールド内に残されたアンローダ先端部による船体拘束力のモデル化を行い、合わせて引き波時の着底の可能性についても検討した[(5)]。

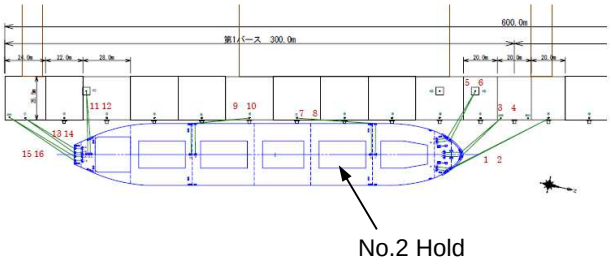


図 1　地震津波来襲時の大型石炭船の桟橋係留状況

3. 主要な結論

(1) 図 2 に当該桟橋前面における津波の水位変動および流速の時系列結果を示す。津波の水位変動、東西および南北流速の最大・最小値はそれぞれ+10.9m(押し波)、-5.0m(引き波)、+0.8m/s(東流)、-1.4m/s(西流)および+0.9m/s(北流)、-1.5m/s(南流)を得た。図 3 には第 1 波押し波来襲時から最大水位に至るまでの港内における津波状況を示す。水位変動は色で示し、流速はベクトル表示している。船体に作用する津波の主波向きは、当初は港口からの津波来襲によりほぼ正横方向であるが、その後は港内に来襲した津波流速が左回りと変化して船首尾方向となっている。また桟橋前面では防波堤や陸岸を越えて到達する津波成分も合わさり、桟橋係留の当該石炭船周りは複雑な流況となっていた可能性がわかってきた。

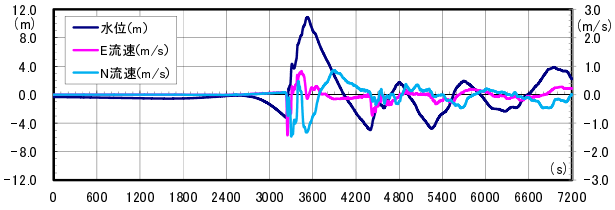


図 2　桟橋前面の津波シミュレーション時系列
(2011 年 3 月 11 日 14:46-16:46)

(2) 船体動揺シミュレーション結果から、防舷材の破損や当該石炭船の桟橋への接触・損傷、さらには係留索の破断や巻き出し、またアンローダ先端部の引きちぎり倒壊は、津波第 1 波来襲の早い段階で発生していた可能性がわかってきた。

4. 参考文献

(1) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について，日本航海学会論文集，第 127 号，pp. 57-68，2012.

(2) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時のｱﾌﾗﾏｯｸｽﾀﾝｶｰ係留避泊に関する一考察，日本航海学会論文集，第 129 号，pp. 19-30，2013.

(3) (社)日本海難防止協会：大地震及び大津波来襲時の航行安全対策調査報告書　-津波影響による船舶避難行動と被災状況等に係る基礎調査-，2012. 3.

(4) 斉藤知秀・森　吉之・内海　博：東日本大震災による火力発電所土木構造物の被害と対策，電力土木，第 360 号，pp. 7-11，2012.

(5) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：港内係留船舶のかく坐による津波対策に関する基礎的研究，日本航海学会論文集，第 128 号，pp. 251-260，2013.

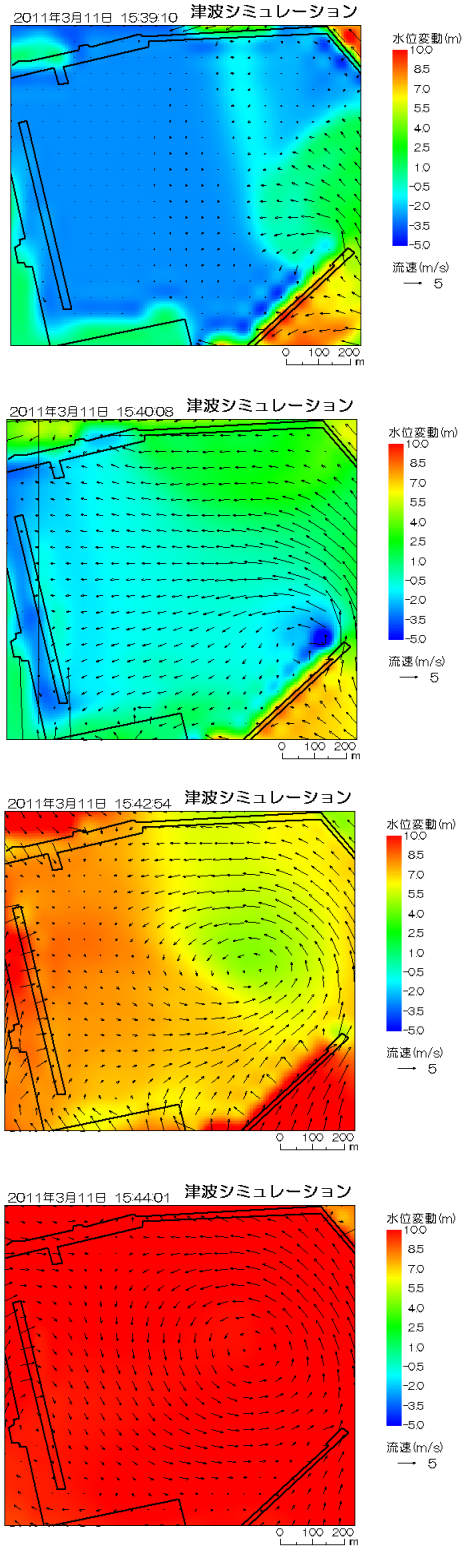


図 3　港内の津波シミュレーション結果

錨泊船舶の波浪中応答シミュレーションに関する研究
第 1 報：MPS 法への Lumped-Mass 法の適用

正会員○増田　光弘（東京海洋大学）　学生会員　笹原　裕太郎（東京海洋大学）
正会員　　南　清和（東京海洋大学）　学生会員　大谷　育穂　（東京海洋大学）

要旨

荒天錨泊中や津波来襲時避泊中の船舶の走錨に伴う船舶の被害を予測するとともに、防災対策を検討することは非常に重要である。しかしながら、荒天錨泊中および津波来襲時錨泊中に作用する係留力は複雑であり、その性状を正確に推定するとともに、防災対策について検討することは難しい。そこで本論文では、第一報として非線形な現象を解くことに特化した数値シミュレーション法である MPS 法に対して係留索の動的挙動解析に対する実績のある Lumped-Mass 法を適用し、その適用可能性について検討を行った。

キーワード：港湾・係留、錨泊、走錨事故、MPS 法、Lumped-Mass 法

1. 緒言

平成 16 年 10 月 20 日の海王丸の座礁事故や平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災時の錨泊船舶の走錨の事例など、荒天錨泊中や津波来襲時避泊中の船舶の走錨に伴う船舶の被害を予測するとともに、防災対策を検討することは非常に重要である。しかしながら、荒天錨泊中および津波来襲時錨泊中の船舶の挙動および作用する係留力は複雑であり、その性状を正確に推定するとともに、防災対策について検討することは難しい。そこで本論文では、第一報として非線形な現象を解くことに特化した数値シミュレーション法である MPS 法[1]に対して係留索の動的挙動解析に対する実績のある Lumped-Mass 法[2]を適用し、その適用可能性について検討を行った。

2. 数値シミュレーション手法

本研究では、数値シミュレーション法に MPS 法[1]を用い、係留索モデルに Lumped-Mass 法[2]を適用することを試みた。本プログラムでは、流体流場解析および浮体挙動の計算を MPS 法により計算し、係留索の動的挙動を Lumped-Mass 法を用いて行うものになっている。以下にその具体的な手順を示す。

① 浮体粒子を含む流体流場解析を行う。この時、係留索粒子については近傍粒子探索および近傍平均流速の計算のみを行う。
② 係留索の動的解析を Lumped-Mass 法を用いて行い係留索上端要素である浮体係留点の粒子にかかる係留索張力を求める。
③ ②で計算された係留索張力を式(1)および式(2)を用いて MPS 法における弱連生剛体計算における浮体粒子修正の際に加え、浮体粒子座標の修正を行う。

$$M_b \frac{d\vec{u}}{dt} = F_f + M_b\vec{g} + T \tag{1}$$

$$I\omega = N_f + T \times r_{Gc} \tag{2}$$

ここで、M_bは浮体の質量、$\vec{u}$は浮体重心の並進速度、F_fは流体力ベクトル、Iは慣性モーメント、ωは角速度ベクトル、N_fは流体力によるトルク、r_{Gc}は浮体重心と係留融資との相対位置ベクトルである。

3. 主要な結論

数値シミュレーションの条件を以下に示す。ここでは、Fig. 1 に示すような二次元数値水槽によって検討を行った。総粒子数は 35,545 個、空間解像度である粒子間距離は 0.01m とした。本研究で使用した船体モデルは長さ 1.95m、喫水 0.13m とし、係留錨鎖は長さ 5.5m、質量 0.188kg/m とした。なお、アンカー点は水槽底面に固定し、船体モデルには風抵抗を模擬して定常的に 4.9N の力を加えた。入射波は、波高 0.05m、周期 1.14sec の規則波とした。

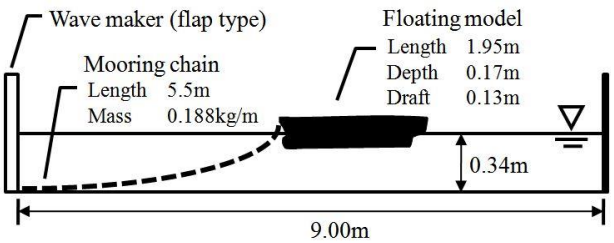


Fig. 1　Calculation setup system

主要な計算結果を以下に示す。Fig. 2 に入射波の時系列を示す。Fig. 3、Fig. 4、Fig. 5 に船体モデルの Surge、Heave、Pitch の各方向の運動の時系列波形を示す。この時、Fig. 3～Fig. 5 では、非係留状態の計算結果との比較を行った。Fig. 6 に計算結果のスナップショットを示す。Fig. 6 中の黒点が質点モデルで表現した錨鎖である。

Fig. 3、Fig. 4、Fig. 5 に示される各方向の運動から､係留状態では錨鎖による運動の拘束がみられ、本ハイブリッド手法による係留索－浮体間の連成が十分に機能していることがわかる。またFig. 6より、錨鎖を表す黒点の浮体運動に伴う動的挙動が良好に表現できていることがわかる。ここでは MPS 法に対して Lumped-Mass 法による係留索モデルを適用した一例を示すに留まっているが、今後は水槽実験結果との比較・検討や著者ら[3),(4)]がこれまで係留条件として用いてきた線形ばねによる拘束条件との比較・検討、さらに荒天錨泊時の係留力に関する先行研究である芳村ら[(5)]の実験結果の再現を試みることによって、本係留モデルの実用性について検討を行っていく予定である。

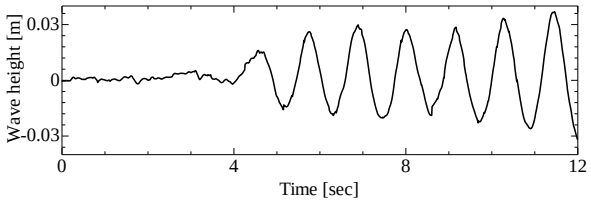


Fig. 2　Time history of wave height

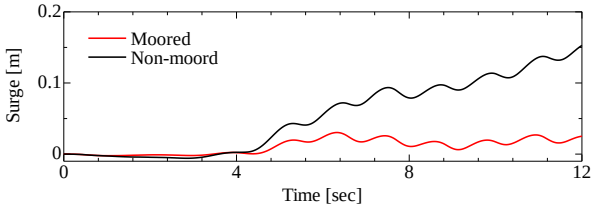


Fig. 3　Comparison of surge motion

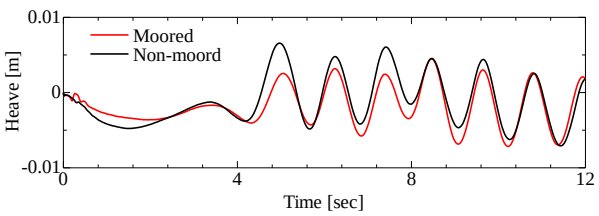


Fig.4　Comparison of heave motion

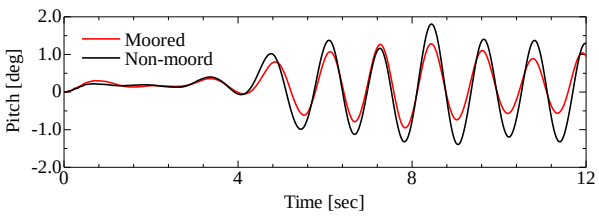
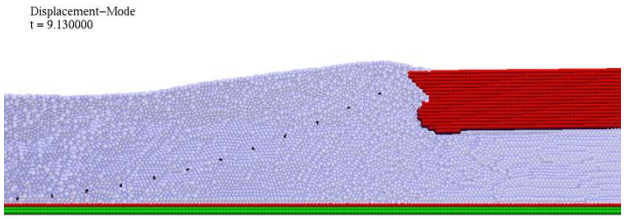
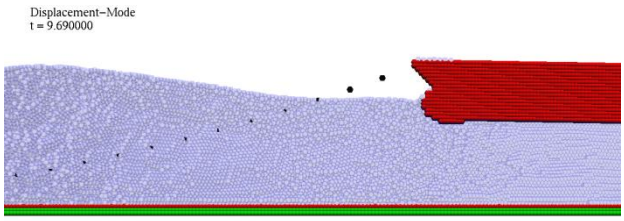


Fig.5　Comparison of pitch angle



a) Time = 9.13 sec.



b) Time = 9.69 sec.

Fig. 6　Snapshots of calculation result

4. 参考文献

(1) Seiichi KOSHIZUKA, Atsushi NODA and Yoshiaki OKA: Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-inplicit Method, Int. J. Numer. Mech. Fluids, 26, pp. 751-769, 1998.

(2) 中嶋俊夫・元良誠三・藤野正隆：質点系モデルによる係留ラインの 3 次元動的解析法，日本造船学会論文集，Vol. 154，pp. 192-202，1983.

(3) 増田光弘・庄司邦昭・南清和・増田光一：係留船舶の津波中挙動シミュレーションに対する 3 次元 MPS 法の適用，日本航海学会論文集，Vol. 125，pp. 175-182，2011.

(4) 笹原裕太郎・増田光弘・南清和・増田光一：係留浮体の波浪中応答解析に対する MPS 法の適用性に関する研究（第二報），日本航海学会論文集，Vol. 129，pp. 31-37，2013.

(5) 芳村康男・雨宮伊作・松川英輔・今吾一：荒天錨泊時の係留力の実験的検証，日本航海学会論文集，Vol. 121，pp. 161-167，2009.

The Improvement of Port State Control in Algeria

Member A.AZOUAOU（Ecole Nationale Superieure Maritime, Algeria）○
Member S.FUJIMOTO（Kobe University Graduate School of Maritime Sciences, Japan）
Member M.OMAE（Kobe University Graduate School of Maritime Sciences, Japan）

Abstract

With a length of more than 1220 kilometers, the Algerian coastline includes 11 major ports. Each year, Algeria receives between 3000 and 7000 ships carrying its foreign trade. To ensure that shipping is efficient and safe, Algeria exercises port state control (PSC), which is performed by port state control officers (PSCOs). These officers are dispatched in stations coming under the administrative of the National Coast Guard Service (NCGS). Algeria decided to ratify the Mediterranean Memorandum of Understanding (MedMoU) in 2000, thus enacting an obligation to set up an efficient system of port state control. It has also to achieve an objective of inspecting 15% of ships calling at its ports by the year 2003. This study will analyse the available statistics for a period of 9 years (2005-2013) and come up with the findings and recommendations on how to improve and enhance the administration of port state control in Algeria.

Keyword：International convention, Education and training, Algerian's PSC and PSCO, MedMoU

1. Background

With a length of more than 1220 kilometres, the Algerian coastline includes 11 major ports. Each year, Algeria receives between 3000 and 7000 ships carrying its foreign trade representing about $120,769 billion U.S. dollars for the year 2013(1). Through the Merchant Marine and Ports Directorate (MMPD), the Algerian government works to protect its waters against pollution and ensure that shipping is efficient and safe. One of the means used to achieve this objective is the port state control (PSC). This right is contained in international law and also in articles 61 and 62 of the Algerian maritime code (AMC)(2).

Before 1995, the port state control and many other obligations contracted by Algeria in ratifying IMO and ILO conventions were poorly discharged. For this reason, in 1996 the Algerian government initiated a radical restructuration of the maritime administration.

In that year, the local maritime administration shifted from the ministry of transport to the ministry of national defence, or more precisely the Coast Guard National Service CGNS, which was created in 1973(3). In the year 2000, Algeria ratified(4) the MedMoU, thus enacting an obligation to set up an efficient system of port state control. A main goal of the ratification was to achieve an annual total of inspections corresponding to 15%(5) of foreign ships entered into its ports by the year 2003. This study will analyse the statistics
of port state control performed by Algeria during 9 years starting in 2005.

Table.1 PSCs performed from 2005 to 2013

	Ships entered	Ships inspected	Inspections %	With deficiencies	Without deficiencies	Deficiencies %	Detentions	Detentions%	Det class related
2005	4657	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	4912	10	0.2	9	1	90	3	30	1
2007	4587	741	16.15	308	433	41.57	11	1.48	1
2008	4259	898	21.08	358	540	39.87	31	3.45	0
2009	3858	409	10.6	191	218	45.76	17	4.16	1
2010	3405	13	0.38	8	5	61.64	4	30.77	0
2011	2946	1	0.03	0	1	0	0	0	0
2012	2842	1	0.03	0	1	0	0	0	0
2013	3114	0	0	0	0	0	0	0	0

Source: MedMoU February 2014 and the Column Ships entered by MMPD.

2. PSC in Algeria

In Algeria, port state control is performed by 27 inspectors. They are dispatched in 24 marine stations administered under the umbrella of three maritime districts, which in turn are managed by the Department of Maritime Affairs (DMA) of the National Coast Guard Service (NCGS). Although this service is run by part of the Naval Forces of the Ministry of National Defence, it carries civilian missions such as port state control on behalf of the MMPD.

The port State does not charge the shipowner with the cost of the initial inspection of the port state control. The charges are only made if the vessel is subject to a detention and the inspector has to return on board for a re-inspection. A ship should not be unduly detained or delayed, otherwise she may be entitled to compensation for all the losses incurred.

The MedMoU has made an obligation for the members to provide an appeal procedure against the decisions of the port state control officers in case of detention. In Algeria, an owner or the shipmaster may send the appeal within 10 days of the detention to the President of the Central Safety Committee (CSC).

3. Issues of PSC in Algeria

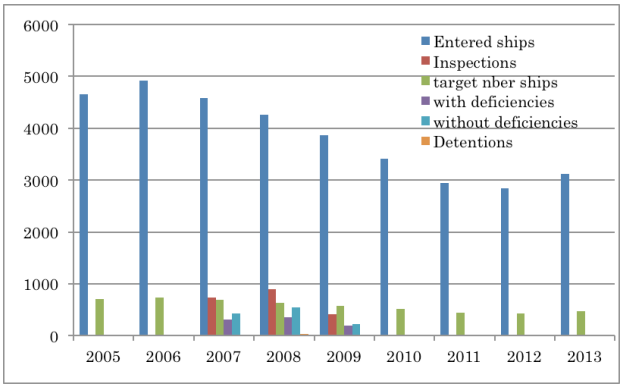


Fig.1 Number of individual ship inspected

Starting with zero inspection in 2005, Algeria achieved the highest total number of 898 inspections in 2008. The inspections figures showed a decreasing trend in the number of inspections of almost 100% in 2010 that continued in 2011, 2012 and 2013.

The MMPD raised the issue that the figures of the MedMoU do not correspond to reality. Algeria has performed inspections during 2005, 2010, 2011, 2012 and 2013; however they were not entered in the database of the MedMoU. The inspections have to be recorded in the database the same day and there is no Internet connection in the maritime stations.

The figure shows clearly that for the 9 years period, the target of 15% was achieved only in 2007 and 2008. The figure indicates that either the ships target factors are not appropriate or the procedures are not being followed appropriately . The data also shows that few vessels were detained and almost no ships were detained after 2010 due to the poor professionnal judgement, or perhaps out of fear for how the decision to detain may induce heavy consequences for the administration in case of improper detainment.

The aforementioned issues are closely linked with the communication equipment and recruitment, background and training of the PSCOs. The officers come with navy education and without seafaring experience. The specialized training in different conventions and port state control procedures was received during one-year of study at the High National Maritime School. Obviously, the theoretical education received is not enough to make a competent PSCO.

4. Conclusion

This study has identified many fields for improvement. To be efficient, the PSC needs means of communication with other member states and the Information Center of the MedMoU. It is a matter of urgency for the Algerian maritime administration to provide an Internet connection to the maritime stations. The PSCOs must be trained in how to properly use and maintain the database.

To better target high-risk ships, the MedMoU has to adopt factors based on the performance of the flag, the classification of the society and the owner, the type and age of the ship.

To achieve the inspection of at least 15 % of ships calling at its ports, Algeria has to build up a system of port state control managed by specialised personnel equipped with laptops and key internet connections, receive practical training in the different conventions of IMO and ILO, and learn the complexity of the different ship types. To be competent the PSCOs should have 5 years of experience at sea, and also have experience as flag state control officers for at least 2 years. Above all, Algeria has to set up a clear policy that all involved parties are aware of, and is implemented in good faith

5.Reference

(1) Algerian Customs : Computer and statistics Bulletin, 01/2014
(2) El-Malakia : Algerian Maritime Code, edition 1998
(3) Ordinance n° 73-12 on 03/04/1973 modified by the Presidential Decree n° 95-164 on 14/06/1995
(4) Presidential Decree n° 2000-58 on 13/03/2000
(5) MedMoU annex in force 27/01/2007, section 1, &1.3

マスト灯の間隔が他船の避航判断に及ぼす影響について
― 護衛艦あたごと漁船清徳丸の衝突事故を例に ―

正会員　西村　知久（海上保安大学校）

要旨

護衛艦あたごと漁船清徳丸の衝突事故に関し、東京高等裁判所は、判決の理由の中で、「あたごの 2 つのマスト灯の間隔が極端に狭く、夜間における横切り関係においては、相手船がそれに幻惑されて判断を誤り、不必要な避航動作等をしてしまう危険性」を指摘している。本研究では、当該危険性について検証するために、東京高等裁判所が採用した航跡に基づき、当該 2 船の接近状況を操船シミュレータで再現し、清徳丸の視点から見たときの、あたごの針路、あたごに対する避航手段等について調査した。また、あたごを概ね全長の同じ貨物船に置換え、同様の調査を実施し、両者の結果を比較検討した。あたごの場合は、貨物船の場合に比べ、実際の横切り関係よりも真向かいに近い横切り関係であると判断する傾向が見られた。また、あたごに対する避航の場合は、貨物船に対する場合とは逆方向に、艦首を横切る方へ右転する傾向が見られた。
キーワード：事故、灯火、海上衝突予防法、針路誤認、操船シミュレータ

1. はじめに

平成 20 年 2 月 19 日午前 4 時 7 分頃（以下、時刻を 0407 のように記す。）、海上自衛隊護衛艦あたご（以下「あたご」という。）と漁船清徳丸（以下「清徳丸」という。）が神奈川県剱埼沖の公海上において衝突し、清徳丸の乗組員 2 名が死亡した。本件については、当該衝突時および衝突直前に航海当直にあたっていた 2 名の海上自衛官を被告人とする刑事裁判が行われ、平成 25 年 6 月 11 日に宣告された東京高等裁判所（以下「高裁」という。）の判決[(1)]において、控訴が棄却され、両名の無罪が確定している。

一方で、当該判決の理由の中で、あたごの事故回避に対する注意義務についても言及されている。その部分を以下に引用する。

「（前略）「あたご」の 2 つのマスト灯の間隔が極端に狭く、夜間における横切り関係においては、相手の船がそれに幻惑されて判断を誤り、不必要な避航動作等をしてしまう危険性があり、（中略）、あたご側が、そのような配慮の下に右転針後の清徳丸を十分に注視していれば、本件事故は避けられていたのではないかと考えられるのである。ただし、これは、本件公訴事実に掲げられた注意義務とは様態を異にする別の注意義務の問題であるから、前記のことから被告人の過失を問うことができないのはいうまでもない。」

過去に実施された夜間における避航判断の研究では、マスト灯の間隔を要素として取り入れた例が見られないことから、本研究では、当該判決の理由の下線部について、マスト灯に関する幾何学的考察ならびに当該事故を再現した操船シミュレータ実験を実施することによって、検証することとする。

2. 幾何学的考察

夜間において、目視により周囲の船舶の動静を判断するためには、当該船舶の航海灯の見え方に頼るほかない。特に、横切り関係にある全長 50m 以上の船舶に関する進行方向については、舷灯の色および操船者の視点と前部マスト灯と後部マスト灯とが成す角（以下「マスト灯の視角」という）から判断することとなる。

マスト灯の視角が針路の判断に及ぼす影響について、幾何学的に考察する。

2.1　あたごのマスト灯の特徴

海上衝突予防法施行規則では、前後部マスト灯の水平間距離は、「当該船舶の長さの 2 分の 1 以上でなければならない」と定めている。あたごの全長は 165m であるため、この定めが適用された場合の前後部マスト灯の水平間距離は、82.5m 以上でなければならない。しかしながら、自衛艦であるあたごは、同法施行規則第 23 条の特例により、その定めがそのまま適用されないため、前後部マスト灯の水平間距離が著しく狭くなっている。

ところで、高裁判決の理由では、あたごの前後部

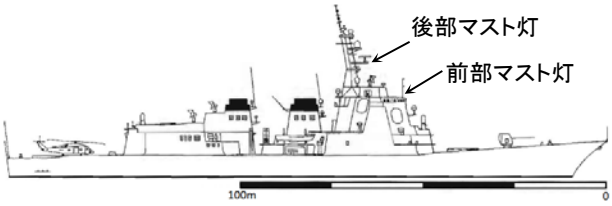


図 1　あたごの側面図[5]（あたごの全長は 165m）

マスト灯の水平間距離を 30mと認定しているが、これは誤りである。横浜地方裁判所が「艦首から約 85m後方のマスト中心部に後部マスト灯が設置」[2]と誤認定したものを高裁が踏襲したものと推察する。

そこで、本研究では、改めてあたごの前後部マスト灯の水平間距離を特定することとする。

あたごの前後部マスト灯の位置については、海上自衛隊ホームページに掲載されているあたごの艦橋および前部ファンネル付近の拡大写真[3]から、艦橋前部の屋根部分とマスト中心部の上部レーダスロットアンテナのステージ前部に設置されていることが確認できる。

同ホームページに掲載されているあたごの正横やや上空から撮影された写真[4]ならびに図 1 に示すあたごの側面図[5]から、前後部マスト灯の水平間距離を割り出すと、それぞれ、10.4m 、9.8mとなる。よって、本研究では、あたごの前後部マスト灯の水平間距離を約 10mとして、議論することとする。

2.2　あたごの針路を誤認する可能性

海上衝突予防法第 23 条 1 項の規定から、後部マスト灯を掲げる義務が課される船舶の全長が 50m以上であることを鑑みると、海上衝突予防法施行規則の特例が適用されない船舶にあっては、前後部マスト灯の水平間距離が 25m よりも狭くなることは稀である。このため、前後部マスト灯の水平間距離が約 10m と極端に狭いあたごの場合は、図 2 に示すように、全長を過小に判断されるだけでなく、針路をも誤認される可能性がある。

3. 検証実験

前章において、マスト灯の視角に関する幾何学的考察から、清徳丸があたごの針路を誤認した可能性について検討した。

本章では、そのことを検証するため、高裁が採用した航跡を基に、夜間におけるあたごと清徳丸の接近状況を海上保安大学校の操船シミュレータで再現し、清徳丸の視点からあたごの動静を監視したときに感じ取ったあたごの針路、あたごに対する避航手段等について調査した。また、あたごを全長 152mの貨物船（前後部マスト灯の水平間距離 110m）に置換えて、同様の調査を実施した。以下に調査方法に関する詳細を記述する。

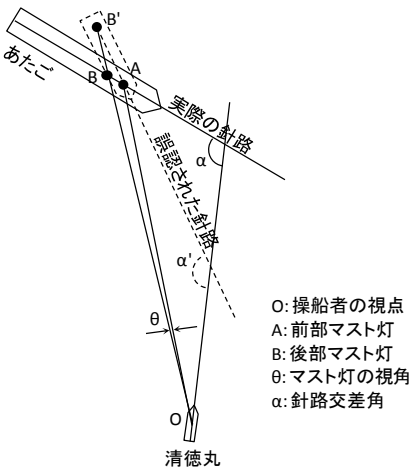


図 2　夜間における針路誤認に関する概念図

3.1　高裁が採用した航跡

図 3 に、高裁が判決を宣告するにあたり採用した、あたごから見た清徳丸の位置関係を基に描いたあたごと清徳丸の航跡を示す。ただし、0405 の清徳丸の位置は、仮に清徳丸が右転しなかった場合の位置である。清徳丸がこのまま直進していれば、あたごの艦尾約 750m のところを航過する。

0400 頃のあたごの動静は、GPS 記録等から、対地針路 327 度、対地速力約 10.6 ノットで航行していたことが特定されている。また、清徳丸は、平均対地針路約 214 度、平均対地速力約 14.2 ノットにて航行していたと推定される。

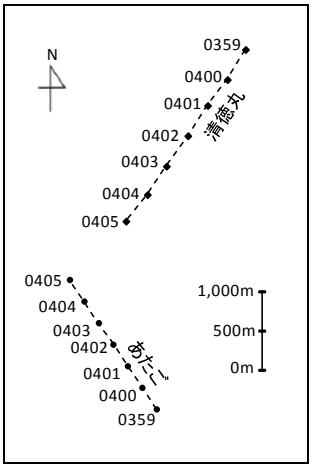


図 3　高裁が判決に用いた航跡

3.2　被験者

海上保安庁の 30 メートル型巡視艇（PC 型巡視艇）の船長 13 名（一級海技士 2 名、二級海技士 8 名、三級海技士 3 名）、ならびに、巡視船または巡視艇の航海科乗組員経験者 15 名（三級海技士 1 名、四級海技士 8 名、五級海技士 6 名）を被験者とした。

被験者に対しては、あたごと清徳丸の衝突事故であることは伏せている。また、前後部マスト灯の水平間距離の影響を調査することを目的としているため、航海計器等は一切使用させず、肉眼により、あたご、あるいは、貨物船を監視させた。

3.3　調査項目

図 3 に示す 0359 の位置からシミュレーションを開始し、0402 の位置において、シミュレーションを終了し、被験者に以下の問について回答させた。

なお、問 3 および問 4 については、被験者の内、船長にのみ回答させた。

【問 1】監視対象船舶の全長は、次の内のいずれに感じましたか。（100m 未満・100m 以上 200m 未満・200m 以上）

【問 2】自船の船首方位を 12 時の方向としたときの監視対象船舶の針路を時計の短針のように記入して下さい。図 4 に 30 分単位で記入願います。

【問 3】互いにこのままの針路速力で航走した場合、監視対象船舶は、自船の前方・後方のいずれを航過すると感じましたか。（前方・後方）

【問 4】監視対象船舶の針路および速力が今後とも変化しない場合、あなたはどのように対処しますか。次の中から選択してください。（右転する・左転する・このまま直進する）

4. 実験結果と考察

紙面の都合上、問 1 および問 3 の詳細な結果については、割愛する。

なお、問 1 については、あたごの全長を「100m 未満」と判断した者が最も多く、79%を占めた。一方、貨物船を「100m 未満」と判断した者は、21%だった。また、問 3 については、あたご、貨物船にかかわらず、監視対象船舶が自船の前方を航過すると判断した者がほとんどを占めた。

4.1　灯火から判断した針路

図 5 に、問 2 に対する回答の集計結果を示す。ここで、30 分については、切り捨てて図に表示している。なお、清徳丸の針路を 12 時の方向としたときの監視対象船舶の針路は、3 時 46 分（3.8 時）が正解である。

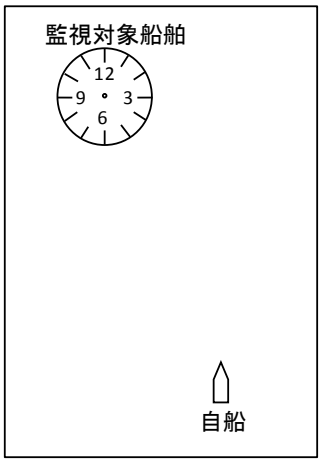


図 4　監視対象船舶の針路記入用紙

あたごを表示したときの平均回答針路は、船長が 4.9 時、乗組員が 5.0 時（いずれも 30 分については、回答のまま処理した。以下同じ。）である。一方、貨物船を表示したときの平均回答針路は、船長が 3.3 時、乗組員が 2.4 時である。

あたごを表示したときは、実際よりも針路交差角を大きく感じる傾向があるのに対し、貨物船を表示したときは、実際よりも針路交差角を小さく感じる傾向がある。

4.2　灯火から判断した避航手段

図 6 に、質問 4 に対する回答の集計結果を示す。貨物船を表示したときは、殆どの船長が左転することを選択している。一方、あたごを表示したときは、半数以上の船長が右転することを選択している。

4.3　実験結果に対する考察

既述のように、後部マスト灯を掲げている船舶は、

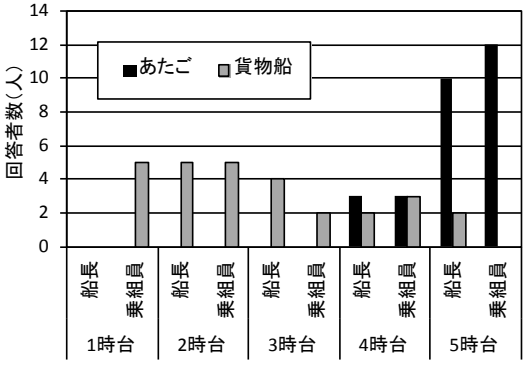


図 5　自船船首方位を基準とした監視対象船舶針路

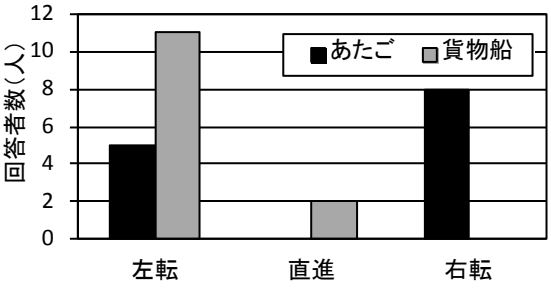


図 6　自船の避航手段

ほとんどの場合、全長 50m 以上の船舶である。

監視対象船舶としてあたごを表示した場合、被験者の多くは、全長 100m 以下の船舶であると判断している。仮に全長 50m の船舶であると判断した場合、海上衝突予防法施行規則の特例に該当しない船舶であれば、当該船舶の前後部マスト灯の水平間距離は、最狭でも 25m である。ところが、あたごである監視対象船舶の前後部マスト灯の水平間距離は、それよりも狭い約 10m である。このため、被験者の多くは、監視対象船舶の全長を実際よりも過小に判断しただけでなく、実際の横切り関係よりも真向かいに近い横切り関係であると誤認したものと考える。その結果、監視対象船舶の船首を横切る方が早期に接近状況を解消できる、あるいは、左舷対左舷で航過できると被験者の多くが判断し、「右転する」との回答が半数を超えたものと推測する。

5. 清徳丸の衝突前の挙動に関する考察

高裁判決の理由では、0404 頃に清徳丸があたごを避航しようとして右転した可能性について指摘している。このことについて、これまでに議論した結果を基に考察する。

高裁判決の理由では、清徳丸の付近を航行していた漁船金平丸が「右転した後にあわてて左転するなど、はなはだ不自然な動きを示している」ことを挙げている。この原因として、あたごの前後部マスト灯の水平間距離が一般商船に比較して狭いため、「横切り関係においては実際の見合い角度よりも小さく感じられ、角度のある横切り関係であっても真向かいに近い横切りと見誤り易い懸念がある。」と指摘し、それを清徳丸にも当てはめたうえで、あたごの事故回避に対する注意義務について言及している。

本件の場合、4 章の実験結果が示すように、実際の横切り関係よりも真向かいに近い横切り関係であると誤認されやすいため、清徳丸があたごの艦尾を航過する状況であったとしても、清徳丸の操船者は、右転してあたごの艦首を横切る方が早期に接近状況を解消できるなどと判断した可能性が考えられる。

以上のことから、清徳丸があたごを避航しようとして右転することは、決して不自然な行動とは言えない。

6. おわりに

本研究では、あたごと清徳丸の衝突事故を例に、前後部マスト灯の水平間距離が極端に狭い船舶が、夜間において横切り関係にある場合には、相手の船がそれに幻惑されて判断を誤り、不必要な避航動作等をしてしまう危険性について、幾何学的な考察を行うとともに、操船シミュレータを用いた実験により、その特徴を確認した。

以下に確認された特徴を示す。

(1) 船舶の全長を過小に判断される。
(2) 角度のある横切り関係であっても、真向かいに近い横切り関係であると誤認される。
(3) 真向かいに近い横切り関係と誤認されることにより、相手の船に船首を不用意に横切られることがある。

護衛艦や巡視船等に代表される前後部マスト灯の水平間距離が極端に狭い艦船にあっては、周囲を航行する船舶から上記の誤認をされ、また、不必要な避航動作をとられる危険性があることを念頭に、特に目視による見張りが主体となる小型船舶に接近する際は、十分注意して航行する必要がある。

また、海上衝突予防法等の法定灯火と誤認されないような光源を用いて、自船船体の前後部を照射することで、上記のような誤認を防ぐことが期待できるものと考える。

参考文献

(1) 東京高等裁判所：平成 23 年（う）第 1545 号判決, 2013.6.
(2) 判例タイムズ, No1376, p225, 判例タイムズ社, 2012.9.
(3) 海上自衛隊ホームページ：http://www.mod.go.jp/msdf/formal/gallery/ships/dd/atago/img/177_22l.jpg, 2014.3.3.
(4) 海上自衛隊ホームページ：http://www.mod.go.jp/msdf/formal/gallery/ships/dd/atago/img/177_15l.jpg, 2014.3.3.
(5) 世界の艦船 2 月号, 通巻第 755 集, p82, 海人社, 2011.12.

視界制限状態におけるレーダー処理上の問題点

鈴木　邦裕（海事補佐人）

要旨

海難審判裁決には相手船をレーダーで探知した時の最接近距離が示されていないなど、霧中衝突時の状況について分析された資料は少ない。そこで先例裁決を引用し、霧中衝突時の視程などを集計して示した。

霧中衝突は在橋者の驚くべき怠慢と無知によって発生しているといって過言ではないが、当時当直者がなにをしていたかについて言及し、また、避航操船に役立つとおもわれる手法を示した。

キーワード：海難、視界制限状態、教育

1. はじめに

本稿は視界制限状態における船舶間の衝突を防ぐための参考資料である。

事故防止の要諦は事例を数多く知ることが肝要である。内航船員（一人当直）は書物を読まないし、教育を受ける機会が少なく、見よう見まねで運航し、事故事例に疎いのが実態である。

2. 視界制限状態における統計

衝突事件 13014 件の裁決中、予防法明治 25 年法律第 5 号、昭和 28 年法律第 151 号適用分は除き、昭和 52 年法律 52 号（現行法）が適用された霧中衝突で船舶相互間の衝突に限定して検索した結果、抽出された件数は 820 件で、これを対象に分析した結果は図 1～図 3 のとおりである。なお、検索は鈴木海事補佐人事務所のデータベースを使用した。

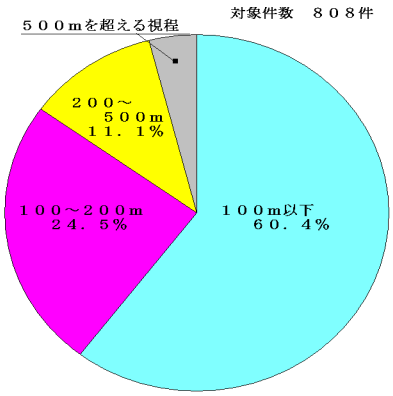


図 1　霧中衝突のうち船舶相互間の衝突

（注１）裁決で視程が海里で表記されているものはメートルに換算した。

（注２）視界制限状態として認定された最大の視程 1.5 海里である。

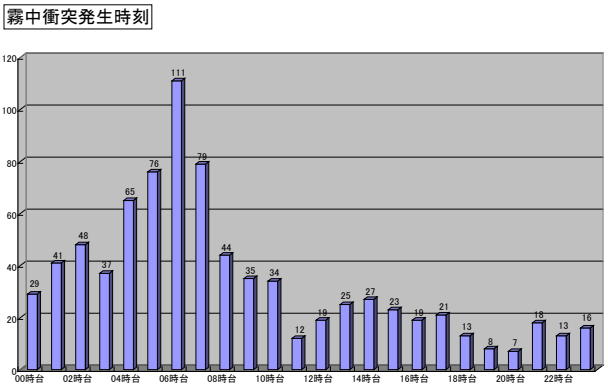


図 2　霧中衝突発生時刻

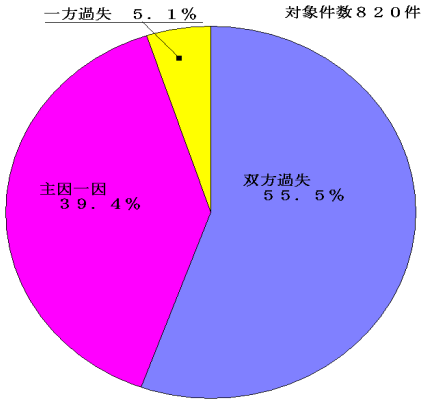


図 3　霧中衝突における過失割合

（注）霧中は双方過失であるという者がいるが俗説であることが分かる。

なお、法令の適用（視界制限状態⇒霧中）は次のとおりである。

1. 船員の常務（単独適用）　29 件
2. 霧中における船舶の航法（単独適用）　773 件
3. 霧中における船舶の航法＋狭い水道の航法　10 件
4. 霧中における船舶の航法＋海交法　4 件
5. 霧中における船舶の航法＋港則法　4 件

3. レーダー見張り怠りの状況

レーダー見張り怠り状況は、霧中衝突事件数812件×2＝船舶数（1624隻中）である。その結果を図4に示す。

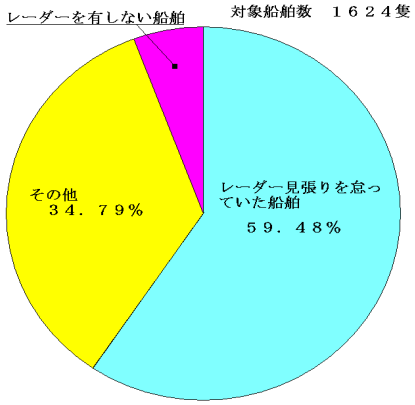


図4　レーダー見張り状況

4. レーダーで相手船を初認した時の模様

4.1　CPA

レーダーで相手船を初認した時の最接近距離を図5に示す。

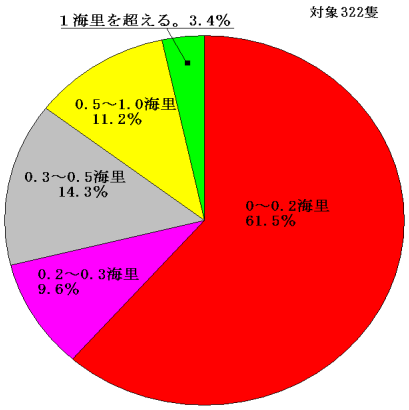


図5　レーダーで相手船を初認した時の最接近距離

4.2　初認距離

初認距離の割合は表1に示すとおりである。

表1　初認距離

距離（海里）	数（隻）	割合（%）
0～0.2	43	13.4
0.2～0.5	12	3.7
0.5～1.0	15	4.7
1.0～2.0	44	13.7
2.0～3.0	51	15.8
3.0～6.0	114	35.4
6.0以上	43	13.3

4.3　初認方向

相手船をレーダーで初認した時の方向を図6に示す。なお、正船首方向を含む右舷側に相手船を初認した事例は全体の72.4%である。

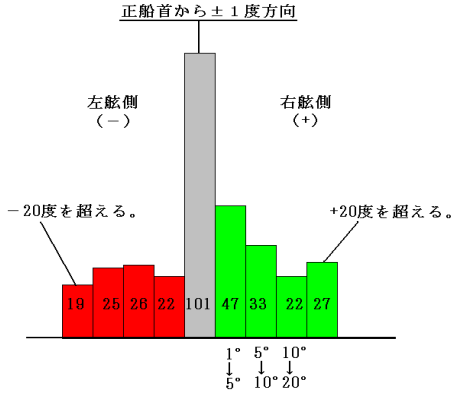


図6　相手船をレーダーで初認した時の方向

4.4　初認時の速力

相手船をレーダーで初認した時の速力は図7のとおりである。衝突した船舶の約77%が初認時8ノット以上で航行していた。

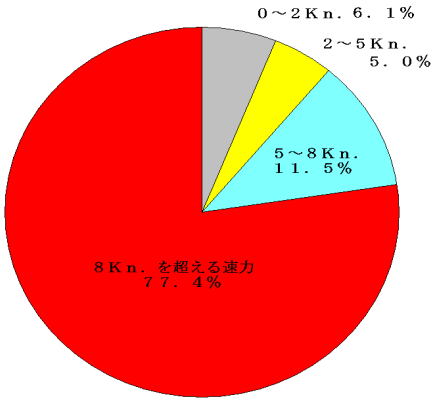


図7　相手船をレーダーで初認した時の速力

4.5　最接近までの時間（分）

最接近までの時間を表2に示す。衝突した船舶の約75%が最接近距離に達する5分以上前に相手船を視認していることが分かる。

表2　最接近までの時間

時間（分）	数（隻）	割合（%）
0～1	47	14.6
1～2	7	2.2
2～5	27	8.4
5～10	105	32.6
10～15	60	18.6
15～20	47	14.6
20以上	29	9.0

5. 海難審判先例の教訓

海難審判先例採決から、「霧中に衝突した当直者はなにをしていたか。」の事例を示す。

1. 霧中、船長と当直者が当直時間割のことで口論となり、これを避けて左舷ウイングに出た船長を当直者が追いかけて、激しい口論を続けていたのでレーダー監視をしなかった。(論外な事例)
2. 囲壁がない操舵室後方の自室にテレビを置いて，ビデオテープの映像を見ることに気を奪われ，レーダー見張りを怠り漂泊中の相手船と危険な状況になっていることに気付かず，衝突した。(橋にも棒にもかからない横着な当直者)
3. 相手船との接近までまだ時間があると思い違いし、降橋して茶を入れに食堂に向かい、戻ったとき相手船を至近に認め、どうすることもできなかった。
4. 受審人は、便所で衝突の衝撃を感じ、急ぎ昇橋して事後の措置に当たった。(責任感のない典型的な横着者)
5. 一見して相手船と無難に航過できるものと思い，レーダーから離れ，甲板員が行っていた海図プロッターの海図交換作業に加わり，動静監視を怠った。(無責任な横着者)
6. 海図台区画から出た後、レーダー画面を見ずに船橋前面中央に移動して前方を見ていたところ、左舷船首方間近に同船の前後部両マスト燈を見た。(海図台の向かうというのは、その間、船橋無人同様であり、危険極まりないことが分かっていない。)
7. 初めて相手船の映像を探知したときに船首左側に認めたことから左舷を対して航過する反航船と思い、航過距離を開くつもりで右転を始めた。(勝手な憶測、相対運動の知識がない初心者)
8. レーダーを全く使用していなかったので、相手船に気付かず、間もなく操舵を放置して船橋後側の無線室に入り、僚船と交信したり、テレビを見たりしているうち、突然船体に激しい衝撃を感じた。(これは横着者で無能力者)
9. 無難に航過して行くものと思い込み、レーダー監視を中断して念のため、双眼鏡を用いて前方をうかがっていたところ至近の距離に相手船を視認した。(衝突を待っていたようなものである。よくあるケース)
10. 2 海里余りに相手船の映像を認め、これを肉眼で見つけようとして前路の見張りにつき以後レーダー監視を行わず衝突(よくあるケース、衝突するのを待っていた典型的なケース)

6. まとめ

視界制限状態時に衝突した船舶の在橋者については、次のことが考えられる。

6.1 レーダーの情報処理能力がなかった。

内航小型鋼船の航海当直者の大多数は、レーダープロッティングについての基礎的な知識が欠如しているといっていい。メンタルプロットなどは論外なことである。

6.2 ARPA 機能を十分に使い熟せていない。

視界が制限されているのに、この機能を使用していなかった、あるいは同機能の使用方法を知らない乗組員が多いことは前示各事例のとおりである。

6.3 レーダー見張りを怠り直前まで相手船の存在に気付かなかった。

見張りの怠りの理由には、怠慢、自己の技量の過信、レーダー見張りの基礎知識の欠如が挙げられる。図 8 は直前まで原針路原速力で航行した事例(平成 12 年仙審第 12 号、時刻 05 時 58 分、自船進路 011°速力 13.7 ノット、他船進路 154°12 ノット方位 355°3.0 海里)とシュミレーションである。

図 8 衝突事例の解析

6.4 相手船を避航するために十分な時間的、距離的余裕があったのに何もしなかった。

何もしなかったのは、怠慢、情報の誤認、誤読、無難に航過できると憶断したか、何をしていいか分か

らなかったかの、いずれかである。

6.5　根拠希薄のまま、みだりに変針して衝突針路となった。

大幅に右転すればいいと思っている当直者が多いが、大幅に右転して衝突針路となった例は多い。要は根拠ある避航操船を行うべきであるが、遺憾ながら現今の内航船員にはこの知識がないと断定してもいい。

6.6　視界制限状態における航法規定についての知識が欠如していた。

左転禁止の規定を知らない者、視界制限状態でも、有視界時の航法が適用されると信じている者、霧中でも狭い水道の航法が適用になることを知らない者もいる。

以上が霧中衝突の主な原因である。このことから、次のことが言える。

6.7　内航小型鋼船の航海当直者にレーダー情報処理能力がないのは、レーダー情報処理に関する知識の有無を確認することが無線従事者免許試験で行われていないことも理由の一つである。

殆どの船社が船員を採用するとき、被採用者が、レーダー情報処理能力を有しているかどうかについてのチエックを行わない（チエック能力がない。）のは問題であろうし、新規採用者を初めて自社船に乗船させた場合、当該船舶の船長は、新規採用者のレーダー情報処理能力（具体的には、他船の針路速力、最接近距離の掌握、ARPA を有効に使用できるかどうか。）の有無を相当直者と共に、少なくとも 1 ワッチ程度在橋して確認すると共に、結果を船社に報告するべきである。

6.8　内航小型鋼船では法制上、六級海技士（航海）海技免状受有者で単独当直が可能であるが、法的に単独当直ができるということとレーダー情報処理ができるということとは別問題であることを認識して抜本的な対策を講じる必要がある。

図 9　レーダー情報解析ソフトのデータ入力

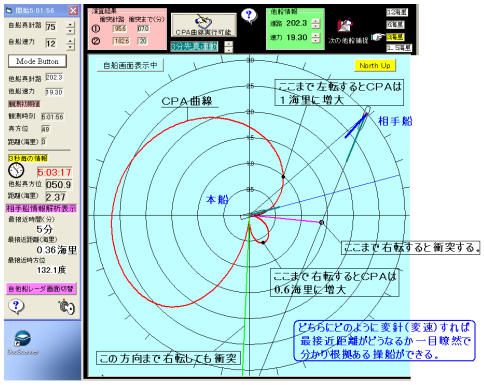


図 10　避航操船方法

6.9　現在の ARPA 機能付きレーダーの殆どは、相手船の情報（進路、速力、最接近距離、接近までに時間）は表示できても、どちらに、どれだけ変針すれば最接近距離はどのように変化するか、また変速によって両船関係はどのように変化するかのシュミレーション機能が事実上ないに等しい。

その機能があっても非常に複雑、ないしは煩雑で実用的ではなく、殆どの当直者が使用していないと断定していい。）このことについての速やかな改善、改良が求められる。

6.10　早急に徹底したレーダー活用のための教育を実船で実施すべき。

教育を担当する者は、内航船員は取扱説明書を読まないのが普通であることを念頭に置いて指導を行わなければならない。具体的な教育内容の一例としては、①相対運動と真運動の相違②相手船の進路、速力の判断方法③最接近距離の判断方法④霧中衝突事例（先例裁決）⑤当該船舶のレーダー画面に表示されている情報の解説⑥当該船舶のレーダー機能の用法⑦PC を使ったシュミレーションである。

以上